



# Building Integrated Photovoltaics Repertorio di casi studio e soluzioni tecniche innovative

V. D'Ambrosio, M. Losasso, E. Tersigni, C. Girardi, S. Gifuni



BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS  
REPERTORIO DI CASI STUDIO E SOLUZIONI TECNICHE INNOVATIVE  
V. D'Ambrosio, M. Losasso, E. Tersigni, C. Girardi, S. Gifuni  
Università di Napoli "Federico II" - DiARC

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità  
Obiettivo: *Tecnologie*  
Progetto: 1.1 Fotovoltaico ad alta efficienza  
Work package: Fotovoltaico Piano  
Linea di attività: LA2.20 BIPV: Repertorio di casi studio e soluzioni tecniche innovative  
Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri ENEA  
Responsabile del Work package: Paola Delli Veneri ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Innovazione tecnologica e progetto di sistemi BIPV per processi di transizione energetica alla scala edilizia e urbana*"

Responsabile scientifico ENEA: arch. PhD Alessandra Scognamiglio  
Responsabile scientifico DiARC (UNINA): prof. arch. Valeria D'Ambrosio

Si ringraziano gli studi di architettura e le aziende che hanno fornito il materiale documentale utilizzato per la presente ricerca.  
In particolare, i Progettisti: Agenzia di Architettura - AdA (arch. I. Rizk), Cool Projects S.r.l., Gdieni Architetti, MCE - The Milan Company S.r.l. (ing. F. Repossi), Pei Cobb Freed & partners architects (arch. M. Milani), Renzo Piano Building Workshop, Silvio d'Ascia Architetti.  
Le Aziende: General Membrane S.p.A., GruppoSTG Fabbrica S.r.l. (dott. R. Macconi), ISA S.p.A. (ing. E. Baldelli), Solmonte S.r.l. (ing. S. Tiozzo Pezzoli), Sunage SA (ing. G. Luzi), Sunerg Solar S.r.l..  
Si ringraziano, inoltre, C. Acquaviva, G. Lo Sapio, A. Giordano e C. Di Marzo per il contributo fornito nell'ambito delle attività di ricerca e catalogazione.

## Indice

SOMMARIO .....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
1.1 LINEE E ATTIVITÀ DI RICERCA .....	5
1.2 LA DOMANDA DI RICERCA .....	6
1.3 OBIETTIVI, METODOLOGIA E FASI DELLA RICERCA .....	10
2 STATO DELL'ARTE SULL'INNOVAZIONE PROGETTUALE E TECNOLOGICA ATTUATA CON SISTEMI BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAICS (BIPV) .....	14
2.1 LO SCENARIO DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA E IL CONTRIBUTO DEI SISTEMI BIPV: INNOVAZIONE TECNOLOGICA E DI PROGETTO	14
2.2 ASPETTI DEFINITORI E CLASSIFICATORI .....	18
2.3 ESPERIENZE DI RICERCA ALLA SCALA EDILIZIA E URBANA .....	20
2.3.1 Ricerche sull'integrazione architettonica dei BIPV alla scala edilizia .....	20
2.3.2 Ricerche europee alla scala urbana .....	25
2.3.3 Principali database e cataloghi di progetti, prodotti e soluzioni BIPV .....	31
2.4 ASPETTI AMBIENTALI E TIPO-MORFOLOGICI CHE INCIDONO SULLA PRODUZIONE ENERGETICA .....	35
2.5 STRUMENTI E SOFTWARE PER LA SIMULAZIONE DELLA PRODUZIONE ENERGETICA DEI SISTEMI BIPV .....	41
3 OFFERTA INDUSTRIALE E INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA DI SISTEMI BIPV. CATALOGHI DI PRODOTTI E CASI STUDIO .....	46
3.1 SISTEMI INTEGRATI E COMPONENTISTICA INDUSTRIALE FV PER L'EDILIZIA: I TREND DELL'OFFERTA PRODUTTIVA .....	46
3.2 SISTEMI FOTOVOLTAICI INTEGRATI E PROGETTAZIONE TECNOLOGICA DELL'ARCHITETTURA .....	49
3.3 CRITERI E INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELL'INTEGRABILITÀ ARCHITETTONICA DEI SISTEMI BIPV .....	52
3.4 CATALOGHI DI PRODOTTI E CASI STUDIO BIPV .....	62
3.4.1 Descrizione dei contenuti delle schede prodotto .....	67
3.4.2 Descrizione dei contenuti delle schede relative alle "buone pratiche" .....	72
3.5 CONSIDERAZIONI SINTETICHE SULLE SCHEDATURE .....	78
3.6 CRITICITÀ E POTENZIALITÀ DI APPLICAZIONE DEI SISTEMI BIPV E POSSIBILI OBIETTIVI DI INNOVAZIONE .....	92
4 REPERTORIO DI SOLUZIONI TECNICHE E SPERIMENTAZIONE PROGETTUALE PER LA VALUTAZIONE DELL'INTEGRABILITÀ E DEI POTENZIALI ESITI ENERGETICI DI SISTEMI BIPV .....	98
4.1 VERSO UNA PROGETTAZIONE MULTIFUNZIONALE E INTEGRATA DI SISTEMI BIPV .....	98
4.2 DEFINIZIONE DI UN REPERTORIO DI SOLUZIONI TECNICHE PER L'INTEGRAZIONE DEI BIPV .....	100
4.3 SPERIMENTAZIONE PROGETTUALE SU UN CAMPIONE DI EDIFICI DI EDILIZIA RESIDENZIALE: METODOLOGIA E FASI .....	103
4.3.1 Il contesto di riferimento: la città metropolitana di Napoli .....	105
4.3.2 Morfologia e tipi di edifici .....	106
4.3.3 Selezione dei casi applicativi .....	108
4.3.4 Struttura e descrizione della schedatura dei casi applicativi .....	111
4.4 ESITI DELLA SPERIMENTAZIONE PROGETTUALE .....	118
4.5 ELABORAZIONE DI UN SET DI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELLA POTENZIALE ENERGIA PRODOTTA DA SISTEMI BIPV .....	122
5 CONCLUSIONI .....	129
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	132
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....	136
8 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO .....	138
9 APPENDICI .....	140

## Sommario

Lo scenario che emerge dalla ricerca scientifica sull'impiego dei sistemi BIPV in architettura mette in evidenza che le tecnologie e i sistemi fotovoltaici hanno raggiunto, ormai, un consistente sviluppo nell'ambito della produzione e dell'installazione, ma risultano ancora poco approfondite, in particolare in Italia, le conoscenze e le modalità di integrazione architettonica, sia nell'edilizia specialistica che nell'edilizia di base. Il concetto di *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) racchiude l'insieme delle tecnologie fotovoltaiche studiate per essere applicate agli edifici come sistemi tecnici integrati in quanto parte dell'involucro edilizio. La diffusione di tali sistemi diventa strategica non solo nel campo dell'efficienza energetica o della riduzione del fabbisogno di energia primaria degli edifici, ma rappresenta un'opportunità per i nuovi scenari che si collegano al progressivo contenimento delle emissioni di CO<sub>2</sub>. La necessità di mitigare le cause degli impatti dei cambiamenti climatici, ormai riconosciuti dalla comunità scientifica internazionale come una minaccia non reversibile, richiede di sviluppare scenari di correlazione fra l'integrazione diffusa del FV negli edifici esistenti, la sperimentazione di nZEB - *nearly Zero Energy Buildings* - ovvero edifici a energia quasi "0" - e l'attuazione dei programmi previsti dai "pacchetti" clima-energia, fra i quali l'Agenda 2030. A fronte di tale condizione, la domanda di ricerca relativa al BIPV nella condizione del progetto alla scala edilizia e urbana si muove a partire dalle implicazioni indotte dall'evoluzione della politica tecnica e delle condizioni di esercizio in vista delle nuove sfide in campo ecologico e ambientale. In particolare, tali implicazioni richiedono una predisposizione del progetto architettonico nella sua concezione e nelle componenti di progettazione tecnologica finalizzate a un'appropriata gestione dei livelli di informazione tecnica, di fattibilità tecnico-operativa e di esecutività finalizzata alla massimizzazione della produzione fotovoltaica attraverso la massimizzazione delle superfici FV e il rendimento dei sistemi.

Il presente documento riporta i risultati dell'attività di ricerca condotta nell'ambito della linea LA2.20 "BIPV: Repertorio di casi studio e soluzioni tecniche innovative" della Ricerca di Sistema Elettrico PTR 2019-2021, *Progetto: 1.1 Fotovoltaico ad alta efficienza* dal Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II. Il report fornisce un inquadramento critico sull'impiego di tecnologie e prodotti innovativi BIPV nel progetto di architettura fornendo specifici approfondimenti connessi al rapporto fra tecnologie di produzione, tecniche esecutive e progetto architettonico, al fine di mettere in evidenza il ruolo centrale che dovrebbe essere rappresentato dall'adeguata diffusione di informazioni e conoscenze tra i protagonisti del processo finalizzandole alla qualità degli interventi. In questo senso la ricerca ha prodotto un quadro aggiornato e sistematizzato sulle conoscenze relative all'innovazione tecnologica dei sistemi BIPV riferiti al mondo della produzione industriale e della loro applicazione al progetto architettonico sia ex novo che di riqualificazione, con particolare riferimento al contesto italiano. Inoltre, attraverso l'elaborazione di *Cataloghi di prodotti e casi studio* e la costruzione di un *Repertorio di soluzioni tecniche BIPV* ha inteso fornire un accrescimento della conoscenza sulle più aggiornate modalità d'intervento attuando un "technology transfer" da buone pratiche, sia nazionali che internazionali, in cui i sistemi fotovoltaici integrati sono parte integrante del concept progettuale e delle tecniche costruttive dell'architettura. Infine, attraverso un'attività di sperimentazione progettuale, sono stati elaborati *Indicatori di produzione energetica di sistemi BIPV* intesi come strumento di supporto da adottare nella fase meta-progettuale di valutazione della potenziale produzione di energia da sistemi BIPV in relazione ai caratteri tipo-morfologici dell'edilizia residenziale a scala nazionale, oltre che ai rendimenti energetici dei sistemi utilizzati e alle soluzioni tecniche adottate.

In riferimento alla domanda di ricerca, alle condizioni di mercato, alla necessità di modificare l'approccio progettuale, tenendo conto di buone pratiche e condizioni di contesto analizzate attraverso la fase di sperimentazione, gli esiti dell'attività condotta nella LA2.20 predispongono all'elaborazione di Linee Guida, previste nella linea LA2.21, in cui sono necessarie un'innovativa consapevolezza e una capacità operativa relative al progetto alla scala edilizia e urbana, attualmente anello debole nell'esperienza nazionale di integrazione del fotovoltaico. Il superamento di questo limite può consentire di elevare e riallineare competenze specialistiche nel campo della produzione industrializzata in campo FV e del progetto edilizio, in un certo senso rimaste poco evolute per il mancato sostegno, fino ad oggi, di una incentivazione e di un'ampia strategia nazionale e internazionale degli interventi di retrofit o di nuova edificazione basati sull'integrazione spinta del fotovoltaico.

# 1 Introduzione

## 1.1 Linee e attività di ricerca

Il presente documento descrive l'attività di ricerca svolta nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) e il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (DiARC) dal titolo "Innovazione tecnologica e progetto di sistemi BIPV per processi di transizione energetica alla scala edilizia e urbana".

Le linee di attività oggetto dell'Accordo si inseriscono nell'ambito del Progetto 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza" della Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021. In particolare, le due Linee di Attività sono la LA2.20, oggetto del presente report, dal titolo "BIPV: Repertorio di casi studio e soluzioni tecniche innovative" e la LA2.21 "BIPV: Tecnologie e linee guida per la diffusione di sistemi BIPV". Le due linee di ricerca sono strettamente correlate e gli esiti della prima rappresentano il punto di partenza per la costruzione delle Linee guida, obiettivo della seconda linea di attività.

L'attività di ricerca LA2.20 parte dal presupposto che le tecnologie e i sistemi fotovoltaici abbiano raggiunto un consistente sviluppo nell'ambito della produzione e dell'installazione, ma che siano ancora poco approfondite, in Italia, le conoscenze e le modalità di integrazione architettonica, sia nell'edilizia specialistica che nell'edilizia di base. Il concetto di *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) racchiude l'insieme delle tecnologie fotovoltaiche studiate per essere applicate agli edifici come sistemi tecnici integrati in quanto parte dell'involucro edilizio. La diffusione di tali sistemi diventa strategica non solo nel campo dell'efficienza energetica o della riduzione del fabbisogno di energia primaria degli edifici, ma rappresenta un'opportunità per i nuovi scenari che si collegano al progressivo contenimento delle emissioni di CO<sub>2</sub>. La necessità di mitigare le cause degli impatti dei cambiamenti climatici, ormai riconosciuti dalla comunità scientifica internazionale come una minaccia non reversibile, richiede di sviluppare scenari di correlazione fra l'integrazione diffusa del FV negli edifici esistenti, la sperimentazione di nZEB - nearly Zero Energy Buildings - ovvero edifici a energia quasi "0" - e l'attuazione dei programmi previsti dai "pacchetti" clima- energia, fra i quali l'Agenda 2030.

Il gruppo di ricerca del DiARC, costituito da docenti, borsisti e tirocinanti, ha sviluppato un'attività di coinvolgimento di diversi stakeholder, con particolare riferimento a studi di progettazione e aziende produttrici, prevalentemente italiane, leader nel settore BIPV, al fine di reperire documentazione tecnica, indagare i fattori chiave di successo e i target raggiunti in alcuni interventi realizzati in Italia.

Inoltre una importante attività nell'ambito della ricerca ha riguardato la partecipazione ad incontri del Task group IEA PVPS Task 15 - *Enabling framework for the development of BIPV, Subtask C (BIPV Guidelines)* al fine di mantenere un aggiornamento costante sugli ultimi sviluppi e avanzamenti della ricerca internazionale e di produrre risultati con essa coerenti e condivisi; l'attività di partecipazione al Task group è consistita nella raccolta di informazioni relative ad interventi BIPV realizzati in Italia, destinate all'elaborazione di linee guida valide a livello internazionale per l'integrazione dei sistemi BIPV in architettura, attualmente in corso di stesura.

È stata attuata, infine, una disseminazione dei risultati di ricerca attraverso l'organizzazione di Seminari presso l'Università di Napoli Federico II, in modalità telematica, che ha visto la partecipazione di alcuni componenti del gruppo di ricerca in qualità di relatori. I Seminari hanno riguardato i "Sistemi innovativi BIPV per il progetto di retrofit edilizio" (14.04.2021); "Soluzioni BIPV per l'involucro edilizio e casi studio in Italia" con la partecipazione di Alessandra Scognamiglio (ENEA), Sofia Tiozzo Pezzoli e Renato Macconi (GruppoSTG Fabbrica S.r.l.) (19.04.2021); "Strumenti per la stima della produzione energetica da FER con sistemi BIPV" (26.04.2021).

Si riporta di seguito l'elenco completo delle attività svolte nell'ambito dell'Accordo di collaborazione.

### Borse di studio

- 12\_B\_2020 "Sistemi BIPV per interventi di carattere tecnologico ed energetico alla scala edilizia e urbana" (C. Girardi, 11.2020/03.2021);

- 13\_B\_2020 “Raccolta ed elaborazione dati per la simulazione delle performance di sistemi BIPV alla scala edilizia” (S. Gifuni, 11.2020/04.2021).

#### *Tirocini formativi*

- “Innovazione tecnologica e progetto di sistemi BIPV per processi di transizione energetica alla scala edilizia e urbana: best practice a scala nazionale; criticità e potenzialità di applicazione dei sistemi BIPV nel contesto produttivo nazionale” (A. Giordano, 11.2020/02.2021);
- “Innovazione tecnologica e progetto di sistemi BIPV per processi di transizione energetica alla scala edilizia e urbana: best practice a scala nazionale; caratteristiche di efficienza dell’involucro (C. Di Marzo, 11.2020/02.2021).

#### *Seminari tecnici presso l’Università di Napoli Federico II – Dipartimento di Architettura*

- “Sistemi innovativi BIPV per il progetto di retrofit edilizio” (04.2021);
- “Soluzioni BIPV per l’involucro edilizio e casi studio in Italia” (04.2021);
- “Strumenti per la stima della produzione di energia da FER con sistemi BIPV” (04.2021).

## **1.2 La domanda di ricerca**

L’adesione al PNIEC - Piano nazionale per il clima (2018) impone di coordinare numerose misure che consentano, sulla scia degli indirizzi internazionali, di raggiungere l’obiettivo della decarbonizzazione dei vari settori dell’economia e, quindi, anche del settore edilizio. In questo campo si incrociano gli aspetti normativi che richiedono risposte molteplici e armonizzate da parte del mondo del lavoro e della produzione ma, soprattutto, da parte di quello della ricerca. Quest’ultimo campo si configura articolato in filiere che conducono, interagendo, dalla ricerca di base alla ricerca operativa, applicata e industriale. Nell’ambito della ricerca operativa, in campo architettonico il progetto - nelle sue componenti morfologiche, tecnologiche e ambientali - si configura come un prodotto di rilevanza oggettiva nel momento in cui si confronta con caratteristiche, prestazioni e condizioni misurabili. Il sistema della ricerca è in tal modo capace di valorizzare e mettere in pratica le condizioni di efficienza energetica e progressiva sostituzione delle fonti fossili con quelle rinnovabili all’interno di uno scenario progettuale in cui le strategie nazionali e internazionali [01] di decarbonizzazione individuano, nel prossimo futuro, fra i principali vettori energetici i sistemi fotovoltaici, in quanto tecnologie avanzate, efficienti prestazionalmente ed efficaci nel rapporto costi - rendimento.

L’innovazione tecnologica nel campo delle tecnologie fotovoltaiche ha quindi necessità di svilupparsi secondo progetti edilizi che siano orientati alla massimizzazione della produzione di energia per essere in linea con gli obiettivi al 2030 e al 2050 che richiedono la progressiva elettrificazione del settore edilizio, che potrà essere sostenuta nei prossimi decenni da un ulteriore “balzo” del FV. Tale slancio, con prodotti e sistemi di nuova generazione, richiederà la massimizzazione della produzione da parte degli edifici e la realizzazione di una infrastruttura digitale per la gestione dei flussi di produzione e per le contabilizzazioni. Peraltro, la massimizzazione della produzione energetica per una parziale o totale autosufficienza energetica degli edifici richiede l’utilizzo, a sua volta massimizzato, delle superfici dell’involucro nei loro orientamenti più efficienti per raggiungere un elevato rendimento delle potenze installate.

All’interno di questo scenario, fra le varie opzioni fotovoltaiche, si apre uno spazio rilevante per il BIPV, poiché la produzione concentrata e su grande scala dell’energia da fotovoltaico non si presta alla produzione e gestione distribuita basata sulle *smart grid* che rappresentano uno scenario fra i più credibili per il prossimo futuro. Tale assetto si configura positivamente per il nostro paese, poiché va a inserirsi in una situazione di ancora eccessiva dipendenza dalle fonti fossili per la produzione di energia.

Lo spazio per l’utilizzo dei sistemi BIPV si amplifica per rispondere alla elevata richiesta energetica da fonti rinnovabili e non può che tradursi nel massimo livello di integrazione architettonica. Il balzo della produzione di sistemi e componenti integrabili, concepiti al pari di una componentistica industrializzata per l’involucro degli edifici, richiede una specifica qualità e innovazione del concept progettuale e della realizzazione tecnico-cantieristica. In questo campo, si determina l’opportunità di colmare un gap che, come è noto, nel nostro paese è particolarmente evidente, ovvero il basso livello di sperimentazione e applicazione di sistemi fotovoltaici integrati negli edifici. Le motivazioni sono note: finora si è pagata un’arretratezza dovuta sia a mancate azioni di incentivazione, a farraginosità burocratico-amministrative, sia a un certo disinteresse della

cultura progettuale italiana più orientata ai livelli di autonomia disciplinare dell'architettura piuttosto che alle frontiere della sperimentazione tecnologica e di contrasto degli impatti ambientali.

A fronte di tale condizione, la domanda di ricerca relativa al BIPV nella condizione del progetto alla scala edilizia e urbana si muove a partire dalle implicazioni indotte dall'evoluzione della politica tecnica e delle condizioni di esercizio in vista delle nuove sfide in campo ecologico e ambientale. In particolare, tali implicazioni richiedono una predisposizione del progetto architettonico nella sua concezione e nelle componenti di progettazione tecnologica finalizzate a un'appropriata gestione dei livelli di fattibilità tecnico-economica e di esecutività per la riduzione dei fabbisogni energetici, la sostituzione delle fonti fossili con l'energia solare e, all'interno di questo ambito, la massimizzazione della produzione fotovoltaica che può essere ottenuta massimizzando le superfici FV e il rendimento dei sistemi; da questo punto di vista le tecnologie BIPV si presentano fra le più performanti per un progetto architettonico rispondente alle richieste della politica tecnica e del mercato.

#### *La domanda di ricerca indotta dalla politica tecnica*

Spesso derivata da accordi e direttive internazionali o dal piano legislativo e normativo nazionale, la politica tecnica si è progressivamente mossa negli ultimi anni determinando implicazioni sull'impiego delle energie rinnovabili e, quindi, dei sistemi fotovoltaici per la produzione energetica. Il sistema normativo e legislativo, attuato dalla politica tecnica recentemente impostata in Italia, inquadra un'interessante apertura verso numerose transizioni, da quella strettamente energetica a quella amministrativa, edilizia e urbana, prefigurando nuovi scenari all'interno dei quali il BIPV - se opportunamente sostenuto sul piano dell'applicabilità, del rendimento e dei costi nel confronto con altre soluzioni FER (Fonti Energetiche Rinnovabili) - può ritagliarsi spazi via via più promettenti. Il percorso non è agevole in quanto dovrà essere sostenuto un confronto con tecnologie competitor sia nel campo del fotovoltaico, che in quello dell'eolico, delle biomasse e della geotermia, senza escludere i sistemi basati sulle tecnologie dell'idrogeno.

La cultura tecnica sulle fonti energetiche rinnovabili ha ricevuto un processo propulsivo che è interessante percorrere sinteticamente in alcune sue tappe per comprendere, in termini schematici, il grado di maturità raggiunto sul piano legislativo e normativo e gli spazi che esse hanno aperto per il fotovoltaico e, tendenzialmente, per le tecnologie BIPV. Si riscontrano, purtroppo, ancora gap attuativi e di carattere amministrativo, tecnico-progettuale e produttivo che possono essere colmati con una forte azione di sensibilizzazione, consapevolezza e valore aggiunto, sostenendo le non sempre note possibilità offerte per il progetto ex-novo o di retrofit tecnologico degli edifici esistenti, in particolare nella relazione con la P.A., il mondo delle professioni e delle imprese di costruzione.

Un primo aspetto rilevante si è avuto con la grande svolta dell'emanazione del "Conto energia", il sistema di incentivazione coordinato dal GSE che incentivava direttamente il kWh fotovoltaico prodotto. Grazie a questo sistema indubbiamente generoso, il fotovoltaico in Italia ha conosciuto una crescita incredibile nel giro di pochi anni: da poco più di 100 MW di installato nel 2007 si è arrivati nel 2013 a circa 18 GW di capacità installata, in buona parte concentrata nel Sud del Paese e caratterizzata dalla presenza di molti impianti di grandi dimensioni. Il 2013, in particolare, è stato l'ultimo anno in cui gli impianti fotovoltaici hanno potuto accedere al Conto energia [01].

Gli impianti fotovoltaici integrati architettonicamente sono normati dal DM 19/02/2007 "Criteri e modalità per incentivare la produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare", che individua 10 tipologie specifiche che vanno dalla sostituzione dei materiali di rivestimento in copertura fino ai frangisole e alle superfici vetrate.

Con il "Pacchetto Clima Energia 20-20-20" nel 2008 sono stati definiti i temi centrali con cui delineare elementi chiave e azioni finalizzate al primo cambio di paradigma verso uno scenario a zero emissioni di carbonio. La scelta di avviare il processo dei pacchetti clima energia ha rappresentato il punto di non ritorno nel passaggio della produzione energetica basata su combustibili fossili a quella su energie rinnovabili.

Il concetto di edifici NZEB è stato introdotto dalla Direttiva Europea 31/2010/CE e, da allora, ogni paese membro dell'UE ne ha recepito criteri e requisiti per la realizzazione degli edifici ad energia quasi zero. In Italia ha avuto un ruolo di avvio il D.Lgs. 192/2005 e successivi aggiornamenti fino al D.Lgs. 63/2013,

tramutato in legge con la L. 90/2013 che ha integrato quanto richiesto dalla EPBD (Energy Performance of Building Directive) introducendo il tema della produzione di energia da fonti rinnovabili in loco. In Italia il più recente intervento normativo per un approccio più completo al tema è quello espresso dal Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 del Ministero dello Sviluppo Economico “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”.

L’Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile - programma d’azione sottoscritto nel settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri dell’ONU - ingloba 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile - Sustainable Development Goals, SDGs - in un programma d’azione per un totale di 169 ‘target’, i cui risultati da raggiungere sono fissati al 2030. Fra tutti gli obiettivi, il n.7 – Energia pulita e accessibile costituisce il riferimento più diretto per le tematiche relative alle energie rinnovabili e, quindi, ai sistemi FV e, specificamente, BIPV.

Per la *Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici* (SNAC) del 2015, il settore energetico rappresenta un esempio di settore economico particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici, come effetto, da un lato, dell’elevata sensibilità della produzione e del consumo di energia rispetto all’andamento delle temperature e ai fenomeni estremi e, dall’altro, della severità dei requisiti ai quali devono rispondere i servizi energetici, in termini quantitativi e qualitativi, in particolare per quanto riguarda la loro continuità. Per quanto riguarda i sistemi FV, si dovrà tener conto che, con l’aumento della temperatura media globale, meno energia sarà richiesta per il riscaldamento degli ambienti e più energia sarà invece richiesta per il loro raffrescamento. Il tema dei picchi di domanda di energia, che influenzano le decisioni fino alla localizzazione degli impianti, vede nei sistemi BIPV una valida e rapida modalità di gestione dell’energia [02]

Il Ministero dello Sviluppo Economico ha pubblicato il 21 gennaio del 2020 il testo Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima (PNIEC), predisposto con il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, che recepisce le novità contenute nel Decreto Legge sul Clima nonché quelle sugli investimenti per il Green New Deal previste nella Legge di Bilancio 2020. Il Piano è lo strumento fondamentale per cambiare la politica energetica e ambientale del nostro Paese verso la decarbonizzazione. Il Piano si struttura in cinque linee d’intervento, che si svilupperanno in maniera integrata: dalla decarbonizzazione all’efficienza e sicurezza energetica, passando attraverso lo sviluppo del mercato interno dell’energia, della ricerca, dell’innovazione e della competitività [03].

I CAM - *Criteri Ambientali Minimi* sono dei requisiti ambientali che vanno rispettati e seguiti nella scelta di determinati prodotti, servizi, lavori e progetti che possono avere, per loro natura, un impatto con l’ambiente, garantendo anche più convenienza in termini di investimento. La loro istituzione avviene con il D. Lgs 11 ottobre 2017 “Criteri ambientali minimi per l’affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici” mentre i CAM relativi al fotovoltaico sono disciplinati dal decreto 11 gennaio 2017 del Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare “Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l’edilizia e per i prodotti tessili”, rispondendo all’esigenza, rispetto alla normativa pregressa, di un adeguamento alle innovazioni tecnologiche e al mercato di riferimento.

Il PNIEC rappresenta il quadro di riferimento per i target climatici ed energetici, delineando le politiche e le misure per raggiungere l’obiettivo del 32% di energie rinnovabili entro il 2030. In Europa è prevista l’installazione di 19 GW all’anno e il solare FV continuerà ad essere la tecnologia di generazione di energia più installata in Europa tra il 2020 e il 2030. Tuttavia, il pieno potenziale del solare in Europa è decisamente superiore e i possibili sviluppi di mercato stimati da SolarPower Europe nel suo ultimo Global Market Outlook nello Scenario Medio, che ha rilevato una media di quasi 24 GW di energia solare aggiunta annualmente in Europa entro il 2024, evidenziano che entro il 2025 il FV in Europa diventerà la principale fonte di energia [04].

Nella Gazzetta Ufficiale n. 285 del 16 novembre 2020 è stato pubblicato il Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 16.09.2020 “Individuazione della tariffa incentivante per la remunerazione degli impianti a fonti rinnovabili inseriti nelle configurazioni sperimentali di autoconsumo collettivo e comunità energetiche rinnovabili, in attuazione dell’articolo 42-bis, comma 9, del decreto-legge n. 162/2019, convertito dalla legge n. 8/2020.” Il decreto definisce i requisiti che devono avere i soggetti per l’attivazione

delle Comunità energetiche rinnovabili, che possono produrre energia per il proprio consumo con impianti alimentati da fonti rinnovabili di potenza complessiva non superiore a 200 kW, definendo altresì i limiti e le modalità di utilizzo dell'energia condivisa prodotta da impianti fotovoltaici che accedono alle detrazioni stabilite dall'art. 119 del decreto-legge n. 34/2020 [05].

Il PNR 2021-2027, previsto dal D.Lgs. 204/1998, è il documento che orienta le politiche della ricerca in Italia, alla realizzazione del quale concorrono le amministrazioni dello Stato con il coordinamento del Ministero dell'Università e della Ricerca. Si tratta di uno strumento di programmazione pluriennale, che mira a contribuire al raggiungimento degli Obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs) delle Nazioni Unite, degli Obiettivi della politica di coesione 2021-2027 e dell'iniziativa Next Generation EU. I grandi ambiti di ricerca e innovazione rispecchiano i sei Cluster di Orizzonte Europa (2021-2027) e gli ambiti della Strategia nazionale di specializzazione intelligente e, in particolare, nell'ambito "Clima, energia e mobilità sostenibile" vi è un richiamo alla catena del valore delle comunità energetiche verso sistemi energetici decentralizzati, valorizzando le interazioni sinergiche tra la transizione del sistema energetico e quella dei sistemi di trasporto verso l'edilizia e la mobilità elettrica *low carbon*. Sono individuate le modalità ottimali di interazione con la rete a livello di distretto urbano e suburbano in funzione di pervasività e capillarità delle FER (Fonti Energetiche Rinnovabili) convertite in situ.

Il PNRR 2021 - Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza presentato alla Commissione europea il 30 aprile 2021 riconosce la centralità delle energie rinnovabili, che entro 10 anni dovrebbero soddisfare il 70% del fabbisogno energetico, nel generare innovazione e sviluppo economico-occupazione per la ripresa del Paese in un'ottica *green*. La semplificazione burocratica normativa, che dovrebbe trovare la sua forma concreta nei prossimi D.lgs. per la Transizione ecologica e D.lgs. Semplificazioni, consentirà il vero cambio di passo nel processo di transizione ecologica, per lo sviluppo di procedure amministrative e assetti regolatori a favore del settore delle rinnovabili e, quindi, del FV [06].

Il Consiglio dei Ministri ha approvato il 28 maggio 2021 il decreto-legge recante la governance del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e le misure di snellimento procedurale con il cosiddetto "Decreto semplificazioni". Queste misure vanno di pari passo con lo snellimento burocratico nel campo dell'utilizzo delle energie rinnovabili. Il Decreto Semplificazioni dovrebbe facilitare le procedure autorizzative per i nuovi impianti produttivi e il repowering di quelli esistenti, le infrastrutture energetiche, i sistemi di accumulo [07].

Alla luce dell'inquadramento schematico nel campo della politica tecnica nazionale, viene ben individuata la domanda di ricerca che deve orientarsi sulle forti potenzialità e sul possibile "primato" del FV già nei prossimi anni rispetto ad altre fonti energetiche.

A valle dello slancio prodotto dal "Conto Energia" e da altri provvedimenti legislativi, si è aperta una terza fase per il fotovoltaico, caratterizzata da numeri più contenuti e da installazioni legate soprattutto al settore residenziale, anche per via dell'esistenza di sistemi di incentivazione indiretti (come le detrazioni fiscali del 50% o, negli ultimi due anni, del Superbonus 110%).

Il fotovoltaico in Italia è arrivato (secondo le stime Enea/IEA) a circa 21,7 GW di potenza installata, di cui circa 0,8 GW installati in un anno difficile come il 2020 (+12% rispetto al 2019). Da un punto di vista della generazione elettrica, la produzione fotovoltaica è cresciuta anche nel 2020 (+9,6%), con circa 25,5 TWh prodotti, pari a poco meno del 10% della produzione netta nazionale. La fase attuale del fotovoltaico - tecnologia preminente nell'ambito delle fonti rinnovabili - vede per la tecnologia un ruolo rilevante per una profonda decarbonizzazione ed elettrificazione dell'edilizia. In particolare, il PNIEC prevede un target di 52 GW di capacità fotovoltaica entro il 2030, che rappresenta oltre il doppio rispetto ai 20,9 GW installati fino al 2019 [01].

Nel sistema della politica tecnica nazionale, finalizzato ad affrontare la prospettiva cruciale della decarbonizzazione, il BIPV può svolgere un ruolo importante per la progressiva sostituzione delle fonti fossili ancora in uso. Ciò richiede il ricorso a innovazioni tecnologiche di maggiore efficienza e a misure di riduzione dei fabbisogni e, quindi, dei consumi di energia, favorendo la transizione verso utilizzi via via progressivi e sempre maggiori di energia elettrica, pur se a fronte di una crescita della domanda di energia dovuta alle dinamiche demografiche. L'allargamento della domanda apre una nuova stagione per i sistemi fotovoltaici

per far fronte a un futuro elettrico a partire dalla chiara e crescente competitività prestazionale ed economica.

Senza una forte accelerazione e promozione nel campo edilizio, non saranno sufficienti le installazioni residenziali e sugli edifici pubblici, ma dovranno essere installati anche un numero cospicuo di grandi impianti a terra (almeno 7-8 GW). Risulta chiaro lo scenario secondo cui potrà determinarsi una competizione non solo fra le FER, ma anche fra le varie opzioni FV all'interno delle quali i sistemi BIPV devono definire un efficace posizionamento strategico e competitivo, tenendo conto che le norme pongono ancora fiducia su una produzione concentrata in grandi impianti.

Nel campo delle Comunità energetiche, correlate ai sistemi BIPV, le tecnologie di produzione, di gestione della domanda e di stoccaggio mirano alla generazione a all'uso di energia rinnovabile a livello locale, ottimizzando la rete di distribuzione energetica e facendo in modo che le soluzioni innovative integrino la produzione energetica nella rete nazionale, fornendo servizi come il controllo del bilanciamento della tensione, la gestione di picchi di consumo energetico, l'abbassamento del picco domanda e il risparmio energetico [08].

Dal punto di vista della qualità ambientale, delle prestazioni integrate per il comfort e l'efficienza energetica degli edifici, per le modalità diffuse di produzione oltre che per quelle di distribuzione e logistiche, nonché per la riduzione degli impatti sull'ambiente, il BIPV rivela maggiori e più interessanti prospettive rispetto ad altre forme di realizzazione e installazione di sistemi FV. Questi aspetti vanno studiati, sperimentati e diffusi al fine di sviluppare competitività oggi ancora presenti in maniera limitata.

### *1.3 Obiettivi, metodologia e fasi della ricerca*

L'impiego di tecnologie e prodotti innovativi nel progetto di architettura richiede specifici approfondimenti connessi al rapporto fra tecnologie di produzione, tecniche esecutive e progetto architettonico, mettendo in evidenza il ruolo centrale che dovrebbe essere rappresentato dall'adeguata diffusione di informazioni e conoscenze tra i protagonisti del processo finalizzandole alla qualità degli interventi. Le potenzialità qualitative e quantitative delle scelte progettuali impongono di considerare preventivamente l'offerta prestazionale e gli effetti sulla concezione architettonica, sulla forma e sul linguaggio dovuti all'incremento del grado di innovazione dei prodotti e al loro aspetto estetico.

In vari campi della produzione industrializzata per l'edilizia, molte innovazioni hanno impiegato anni per affermarsi in quanto poco rispondenti ai saperi tecnici detenuti dalle maestranze edili. In altri casi, gli adattamenti sono invece risultati interni, cioè di adeguamento ai cambiamenti del mercato e in assenza di precise politiche tecniche di incentivazione. Un esempio di tale processo è fornito dalla micro-industrializzazione degli anni Ottanta-Novanta, cui è seguita una costante micro-innovazione dei prodotti per gli interventi di edilizia diffusa, spesso di tipo incrementale, in altri casi di tipo radicale con strutturazione dei prodotti in forma di sistemi o microsistemi. L'innovazione si configura sempre come una progressione in avanti, tesa alla ricerca di soluzioni che restituiscano nuove risposte, adeguate alle esigenze dei soggetti del processo edilizio e dell'utenza finale, non soddisfatte da quanto offerto da concezioni, prassi operative e prodotti convenzionali. Tale traguardo può infatti attuarsi in base alle opportunità fornite dalla ricerca nel campo dei nuovi materiali e prodotti, dei nuovi processi produttivi e di assemblaggio, nonché delle nuove procedure di progettazione degli interventi e di gestione dei processi. Spesso le innovazioni si sono presentate nel corso della storia secondo le forme tecniche che le avevano precedute e solo in secondo tempo hanno acquisito autonomia morfologica e tecnologica: questa è la sfida alla quale sia la produzione di sistemi e componenti che la progettazione con sistemi BIPV è chiamata a rispondere all'interno di una evoluzione della cultura del progetto.

Oggi il ruolo del design del prodotto industriale edilizio favorisce il posizionamento competitivo di prodotti BIPV morfologicamente o esteticamente caratterizzati e costituisce un fattore di differenziazione fra vari prodotti, fra loro alternativi per piccoli dettagli legati alle texture, ai trattamenti superficiali, ai formati, ai colori, alla consistenza materica, alle possibilità combinatorie e di integrazione, alle connessioni.

L'utilizzo di prodotti e sistemi innovativi BIPV determina implicazioni non solo sul processo realizzativo ma sulla concezione del progetto, sulla sua qualificazione spaziale, sugli esiti morfologici e linguistico-espressivi. La concezione dell'edificio come un sistema integrato prelude al superamento di un edificio definito per parti funzionalmente distinte in maniera netta. Strutture, chiusure, partizioni e impianti mantengono certamente una loro identità funzionale e tecnica, ma rispetto alla sommatoria di prestazioni convenzionalmente offerte si configurano come parti che forniscono risposte multiple, multifunzionali e integrate.

Alla luce di tali considerazioni la linea di attività LA2.20 si pone i seguenti obiettivi.

Un primo obiettivo è quello di produrre un quadro aggiornato e sistematizzato sulle conoscenze relative all'innovazione tecnologica dei sistemi BIPV riferiti al mondo della produzione industriale e della loro applicazione al progetto architettonico sia ex novo che di riqualificazione, sia nel contesto europeo che in quello italiano, per il perseguimento di obiettivi di decarbonizzazione. Attraverso la consultazione di numerosi fonti (studi di settore, pubblicazioni, database) ed il confronto con diversi soggetti (aziende, studi di architettura, enti) sono state approfondite le conoscenze su casi studio e sugli aspetti relativi al contesto normativo e produttivo nazionale, al fine di tracciare uno stato dell'arte sull'uso del fotovoltaico BIPV in Italia, con la finalità di far emergere i principali fattori di criticità alla sua diffusione sul territorio e a individuare le principali domande di ricerca emergenti dalla specifica condizione nazionale.

Un secondo obiettivo della linea di ricerca attiene l'elaborazione di repertori di prodotti, casi studio e soluzioni tecniche BIPV attraverso cui accrescere la conoscenza sulle più aggiornate modalità d'intervento attuando un "technology transfer" da buone pratiche, in cui i sistemi fotovoltaici integrati sono parte integrante del concept progettuale e delle tecniche costruttive dell'architettura.

In particolare, il Repertorio di soluzioni tecniche, costruito a partire dallo studio delle soluzioni ricorrenti di maggiore efficacia relative ai diversi sistemi e componenti dell'involucro edilizio, potenzialmente replicabili e adattabili al contesto d'intervento italiano, si propone come strumento di indirizzo per i progettisti e gli operatori del settore. Per valutare le condizioni di applicabilità di soluzioni BIPV rispetto al contesto italiano è stata condotta una sperimentazione progettuale su un campione di edifici di edilizia residenziale, con la finalità di individuare, rispetto a un set di indicatori (rapportati a tipi edilizi ricorrenti, differenti tessuti e densità urbane, orientamento e inclinazione), i potenziali esiti in termini energetici derivanti dall'utilizzo dei sistemi BIPV.

La ricerca si è sviluppata in 3 fasi (Figura 1) articolate come segue:

- una prima fase analitico-conoscitiva ha riguardato la definizione di uno stato dell'arte aggiornato sugli aspetti di innovazione progettuale e tecnologica attuata attraverso l'utilizzo di sistemi e componenti BIPV. In questa fase sono state esaminate le principali esperienze di ricerca europea alla scala edilizia e urbana analizzando con approccio critico i principali esiti riferibili a database di progetti, prodotti e soluzioni tecniche BIPV. Dal confronto con la letteratura scientifica sul tema sono stati sistematizzati i principali criteri e indicatori impiegati in maniera ricorrente per la valutazione dell'integrabilità dei BIPV in architettura e sintetizzati gli aspetti ambientali e tipo-morfologici che incidono sulla producibilità energetica. Infine, sono stati analizzati i tools elaborati nell'ambito delle ricerche internazionali per la simulazione della produzione energetica da BIPV in architettura.

Dall'analisi dello stato dell'arte, la seconda fase dell'attività, di tipo sintetico-comparativo, ha condotto alla elaborazione dei primi due prodotti della ricerca:

- *Catalogo di prodotti BIPV*. Il catalogo si riferisce a una schedatura dell'offerta industriale di sistemi e componenti BIPV presenti sul mercato italiano, rappresentativi di specifiche tipologie merceologiche con informazioni circa le prestazioni e le caratteristiche di integrazione architettonica degli stessi, effettuata attraverso un sistema di indicatori facendo emergere i vantaggi applicativi e i plus prestazionali offerti (cfr. Appendice 1).



Figura 1. Flow-chart con le fasi della linea di ricerca LA 2.20 e relativi prodotti.

- *Catalogo di casi studio BIPV*. Il catalogo di riferimenti progettuali nazionali e internazionali “esemplari”, efficaci dal punto di vista dell’integrazione del BIPV nel concept progettuale dell’edificio e dei risultati conseguiti in termini di integrabilità architettonica, trasferibilità di buone pratiche e di contributi alla riduzione del fabbisogno energetico e degli impatti ambientali; il catalogo è distinto in schede sintetiche relative a casi di successo di integrazione BIPV, (150 schede, di cui 60 riferite a esempi nazionali e 90 a esempi europei; cfr. Appendice 2) e schede analitiche relative alle buone pratiche (30 schede, di cui 15 riferite a esempi nazionali e 15 a esempi europei; cfr. Appendice 3).

A valle della seconda fase dell’attività è stata effettuata un’analisi delle principali criticità e potenzialità di applicazione di sistemi BIPV rispetto al contesto normativo e produttivo nazionale, individuando i possibili obiettivi di innovazione su cui può orientarsi l’industria di settore.

Nella terza fase della ricerca, di tipo progettuale-sperimentale, sono stati elaborati due prodotti:

- *Repertorio di soluzioni tecniche BIPV* di supporto alla progettazione, installazione e gestione di sistemi BIPV. Le soluzioni sono state elaborate a partire dall’analisi dei casi studio e dell’offerta produttiva di componenti BIPV, nonché dalla sintesi della letteratura tecnico-scientifica di riferimento e dal confronto con diversi stakeholder (aziende produttrici, società di servizi, progettisti, ecc.).

- *Indicatori di produzione energetica di sistemi BIPV*. Il set di indicatori si propone come uno strumento da adottare nella fase meta-progettuale di valutazione della produzione potenziale di energia da sistemi BIPV in relazione ai caratteri tipo-morfologici dell’edilizia residenziale a scala nazionale, oltre che ai rendimenti energetici dei sistemi utilizzati e alle soluzioni tecniche adottate.

Questa fase della ricerca ha previsto un'attività di sperimentazione progettuale nella quale le soluzioni tecniche del Repertorio sono state applicate su un campione di edifici residenziali esistenti nel contesto urbano della città di Napoli, al fine di simularne gli esiti energetici rispetto a condizioni specifiche di contesto. La scelta di effettuare la sperimentazione sul patrimonio residenziale esistente - circa 32 milioni di abitazioni - è stata ritenuta strategica in quanto costituisce da un lato una sfida complessa per le maggiori problematiche inerenti l'integrabilità architettonica, dall'altro rappresenta una opportunità per promuovere la diffusione dei sistemi BIPV all'interno delle più ampie logiche del retrofit tecnologico e delle azioni di *renovation building* legate all'incremento della qualità dell'abitare e al perseguimento degli obiettivi di decarbonizzazione del settore edilizio. La sperimentazione è stata condotta costruendo differenti scenari di applicazione delle alternative tecniche in contesti urbani e edilizi esistenti considerando: tessuti urbani; caratteristiche tipo-morfologiche dell'edificio; condizioni di orientamento; valore architettonico dell'edificio.

## 2 Stato dell'arte sull'innovazione progettuale e tecnologica attuata con sistemi Building Integrated Photovoltaics (BIPV)

### 2.1 Lo scenario della transizione energetica e il contributo dei sistemi BIPV: innovazione tecnologica e di progetto

#### *Lo scenario della transizione energetica all'interno della transizione ecologica*

La stima effettuata dall'IPCC nel report del 2018 evidenzia quanto, rispetto ai livelli preindustriali, si sia ormai in presenza di un incremento di circa 1 °C della temperatura del pianeta e il superamento della soglia di 1,5 °C potrà determinare un *feedback loop* non controllabile, esponendo gli ecosistemi a mutamenti climatici a cascata [09]. La convinzione che le scelte di adattamento e di mitigazione nel breve termine influenzeranno i rischi del cambiamento climatico per tutto il XXI secolo pone i governi e le comunità di fronte a decisioni importanti [10]. Un obiettivo di gran lunga prevalente lungo tutto lo spettro della politica tecnica conduce alla transizione verso una società a zero emissioni di carbonio: una importante possibilità è offerta dalle energie rinnovabili che stanno rapidamente inserendosi come fonte primaria sul mercato e, in particolare, nella componente fotovoltaica, che potrà vivere una seconda generazione rispetto a quanto avvenuto rispetto all'inizio degli anni '2000.

Negli ultimi 50 anni la crescente richiesta di energia primaria è stata soddisfatta quasi interamente da fonti non rinnovabili, con un conseguente raddoppio della concentrazione di agenti climalteranti in atmosfera. Quando i principali quattro settori infrastrutturali dell'economia (*Information and Communication Technology*, Energia ed elettricità, Mobilità e logistica, Edilizia) hanno cominciato a "sganciarsi" dall'utilizzo dei combustibili fossili e ad "agganciarsi" alle energie rinnovabili, alle tecnologie "pulite", efficienti e sostenibili, nonché ai processi di circolarità e resilienza che ne costituiscono la base per una prospettiva di società ecologica, i combustibili fossili che attualmente alimentano i metabolismi degli edifici e delle città sono divenuti *stranded assets*, beni attivi ma non utilizzabili e quindi destinati a perdere valore nei prossimi anni. Se si accelererà su una politica di contrasto dei cambiamenti climatici, i tre quarti delle riserve conosciute di combustibili fossili non dovranno più essere estratte. La rivista Nature nel 2015 ha svolto una stima attendibile delle riserve che rimarrebbero inutilizzate: se si vuole mantenere l'incremento delle temperature globali al di sotto dei 2 °C, l'82% delle riserve fossili non deve essere più utilizzata [11]. Ormai la "bolla" del carbonio è in crescita e il crollo della civiltà industriale basata sui combustibili fossili potrebbe avvenire entro il 2030 [12a].

#### *La decarbonizzazione, la crescita della domanda energetica e l'incremento della produzione da fotovoltaico nello scenario della digitalizzazione del settore elettrico*

L'inversione della rotta è diventata una priorità di ordine planetario che deve essere affrontata necessariamente incrementando il settore della produzione elettrica, facendo ricorso alle energie rinnovabili. Numerosi studi dimostrano quanto ormai il costo medio dell'energia da fonti rinnovabili sia livellato (LCOE - Levelized Cost of Energy) rendendo l'energia prodotta con gli impianti solari più economica di quella prodotta con energia fossile o da reattori nucleari efficienti [13]. Fra le fonti energetiche rinnovabili con maggiore potenzialità di crescita rientra l'energia elettrica prodotta con sistemi fotovoltaici, che è cresciuta dai 2,6 GW del 2004 ai 227 GW del 2015, con una fortissima riduzione dei prezzi e con il vantaggio di fornire energia immediatamente utilizzabile senza costi di trasmissione, consentendo di arrivare di fatto alla *grid parity* [14].

Un dato rilevante riguarda la riduzione del costo medio di generazione del solare fotovoltaico, che dal 2009 si è ridotto dell'80% grazie ai progressi nella scienza dei materiali e nelle tecnologie. Si potrà fare affidamento su un costo via via più basso e soprattutto non esposto alla volatilità che caratterizza i costi delle fonti energetiche da idrocarburi e gas. Stimando che il fotovoltaico rappresenta oggi oltre il 60% della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili nel mondo, si comprende quanto dovrà essere inevitabilmente progressiva la sua espansione, a maggior ragione se si confrontano i circa 160 GW della capacità riproduzione delle rinnovabili nel 2017 con i 300 GW all'anno stimati nel 2040, in cui la quota delle rinnovabili nel mix energetico mondiale rappresenterà oltre il 60% [15a].

La crescita della domanda energetica nel futuro sarà connessa all'incremento della popolazione, che nel 2050 dovrebbe raggiungere i 9 miliardi a scala planetaria, con circa i 2/3 della popolazione che vivrà in megalopoli e città densamente popolate. Il tema degli edifici diventerà centrale sia per la produzione di materiali e componenti (in cui acciaierie e cementifici continueranno ad essere particolarmente energivori) sia per la gestione del ciclo di vita nella climatizzazione, nell'illuminazione artificiale e nell'utilizzo degli elettrodomestici. Ciò dovrebbe condurre entro il 2040 a un incremento di 1/3 della domanda primaria di energia e del 50% del consumo di elettricità.

Le stime sul fabbisogno di energia elettrica per la climatizzazione degli edifici riusciranno a coprire entro il 2050 almeno il 65% e tale dato si accoppierà alla maggiore efficienza e all'incremento dell'isolamento termico. L'incremento spinto dell'elettrificazione per raggiungere gli appropriati livelli di neutralità carbonica previsti per il 2030 inevitabilmente spingeranno per un forte incremento dell'elettrificazione supportata da energia rinnovabile da fotovoltaico. La spinta alla elettrificazione dovrà essere rafforzata dalla digitalizzazione del settore con reti intelligenti che abiliteranno sempre più la penetrazione delle rinnovabili e del fotovoltaico, in particolare attraverso contatori intelligenti e piattaforme di aggregazione di generazione distribuita con una domanda attiva di impianti di stoccaggio [15b].

*Renovation building e nuovi edifici come micro-centrali di generazione di energia: un'opportunità per integrare il fotovoltaico*

Una tappa obbligata sarà il rinnovo degli edifici esistenti e un nuovo concept progettuale per quelli ex novo per aumentarne l'efficienza energetica e dotarli di impianti capaci di captare energia rinnovabile, in modo che essi diventino micro-centrali di generazione energetica. Sarà necessario integrare sistemi di elevato isolamento e capacità termica insieme a sistemi di climatizzazione efficienti. Per captare la massima energia solare possibile, la cui caratteristica è di essere intermittente, bisognerà incrementare accanto al grado di rendimento dei sistemi fotovoltaici anche la capacità di incorporarli in ogni punto dell'edificio, considerato come una micro-infrastruttura fra le più efficienti tecnologie di accumulazione dell'energia.

Ogni edificio dovrà essere *carbon neutral* e questo obiettivo colloca i sistemi fotovoltaici integrati al centro di una rinnovata attività di progettazione. Tutti gli edifici dovranno essere climatizzati elettricamente. Le caratteristiche progettuali della piattaforma *peer to peer*, distribuita e non centralizzata, le conferiscono una caratteristica con effetto di rete, open source e a scala laterale piuttosto che con integrazione verticale. Ogni luogo ha la possibilità di essere relativamente autosufficiente nella produzione di energia FV poiché il surplus di elettricità potrà essere accumulato e successivamente suddiviso in relazione all'esigenza di energia collegando una moltitudine di piccoli operatori quasi come "cooperative elettriche". Un'energia di carattere distribuito ha anche una governance distribuita. Si permette in tal modo agli utenti di esercitare un controllo sui propri consumi energetici riducendoli nelle fasce orarie di maggior picco e, quindi, di maggior costo.

*L'innovazione di processo: le smart grid e i sistemi Building Integrated Photovoltaic*

Gli edifici rappresenteranno sempre più - secondo le parole di Rifkin - la "membrana semipermeabile" che consente di immagazzinare l'energia, una cellula di un grande organismo tecnologico che unisce un gran numero di comunità collettivamente impegnate in rapporti economici sociali e politici complessi [12c]. Edifici-nodo, concepiti come micro-centrali energetiche, dovranno essere incorporati in una rete elettrica dotata di tecnologia di accumulazione per fornire continuità al flusso di elettricità intermittente stabilizzando i carichi di picco: ciò potrà avvenire solo con una connettività digitale, poiché «in tal modo l'infrastruttura elettrica intelligente distribuita consentirà a consumatori di elettricità prima passivi di divenire gestori attivi della propria elettricità verde» [12d].

Gli interventi di *Building Integrated Photovoltaics* rispondono pienamente alle modalità secondo cui interpretare in maniera innovativa l'energia, la sostenibilità, la produzione distribuita e rinnovabile, nonché l'attenzione alla riduzione dei fabbisogni energetici, alla condivisione dell'energia e dei dati ad essa relativi [16a]. Da campo sperimentale e legato a una tematica tecnico culturale di nicchia, il settore energetico del fotovoltaico integrato negli edifici può diventare uno dei settori più dinamici e innovativi all'interno del più generale quadro di sostituzione delle fonti fossili con fonti rinnovabili.

L'applicazione diffusa negli edifici rende il fotovoltaico come uno dei motori di modificazione del paradigma tradizionale di generazione dell'energia, lasciandosi alle spalle i fattori delle *commodity*, che facevano del fotovoltaico un settore bloccato, e approdando alla cosiddetta "generazione distribuita" che consente a qualsiasi soggetto privato o pubblico di autoprodurre una parte dell'energia del proprio fabbisogno. Trovando una risposta combaciante a tali obiettivi da parte delle soluzioni BIPV, si attua il passaggio da una produzione centralizzata ad una generazione distribuita, in cui è il singolo soggetto che investe e che, da tale investimento, riceve un ritorno economico. La generazione distribuita è caratterizzata da una miriade di piccole realtà generatrici di energia, modificando l'impatto su una rete che non può sostenere tutta l'energia prodotta in modo non programmabile e aprendo quindi a una altrettanto capillare diffusione dei sistemi in grado di accumulare energia nei momenti in cui vi è un eccesso di produzione rispetto al fabbisogno. L'affermazione dell'autoproduzione con i BIPV più i sistemi di accumulo inducono alla costituzione di comunità energetiche di *prosumer*, ovvero di produttori e utenti-consumatori nello stesso tempo.

In termini di smart Energy un aspetto rilevante è costituito dalla riduzione dei consumi e delle emissioni inquinanti, sviluppando una coscienza energetica in cui la riduzione dei consumi acquista valore, ricordando il pessimo rendimento del building stock italiano che si aggira tra 100 e 160 kWh/m<sup>2</sup> anno. La condizione di comunità energetica e, quindi, l'istituzione di un modello collettivo e condiviso, definisce modelli di business finalizzati ad abilitare questa trasformazione, consentendo alle comunità di operare in modo che l'eccesso di energia prodotto dagli impianti fotovoltaici di proprietà dei suoi membri sia messo in rete in un pool virtuale di energia cui possono attingere gli altri membri della comunità, in quel momento non autosufficienti [16b].

Le comunità energetiche sono quindi strettamente connesse all'autoproduzione di piccoli impianti fotovoltaici necessariamente integrati nell'involucro edilizio per aumentare le superfici, e quindi la produzione, e innovativi per l'incremento dei rendimenti. L'evoluzione di tali sistemi verso il modello condiviso è resa attuabile dalla diffusione delle tecnologie digitali per uno scambio dati bidirezionato fra i consumatori e la rete, una programmazione accurata della domanda e dei consumi attraverso tecnologie *blockchain*<sup>1</sup> per uno scambio di energia *peer-to-peer*, secondo una infrastruttura di *internet of things* che consente pagamenti in tempo reale con compensazioni automatiche senza l'intermediazione di operatori centralizzati.

Per rendere efficiente l'intero sistema dell'infrastruttura energetica basata sulle fonti rinnovabili dovrà inoltre essere attuata una efficace partnership pubblico-privato fra governi e Energy service companies (ESCO). Alle ESCO viene riconosciuta la parte principale della produzione di energia prodotta, pari fino all'85% finché, dopo il ristoro completo dell'investimento finanziario, il contratto viene sciolto con tutti i benefici futuri riversati sul cliente privato. La combinazione socialmente impegnata del privato diventa parte del business plan poiché ogni ESCO è sempre alla ricerca di nuove tecnologie e processi gestionali innovativi per rendere redditivo il proprio investimento, mentre le comunità ricevono benefici in termine di bollette più basse, utilizzo di energia rinnovabile e riduzione dell'inquinamento.

Il radicale indirizzo all'innovazione rappresenta per l'industria una convergenza tra azioni business e risultati di mitigazione climatica, prevedendo un approccio dinamico e adattivo in particolar modo per le imprese *multiutility* con profilo aziendale resiliente e multiservizi.

---

<sup>1</sup> Il sistema *blockchain* sostiene e abilita la generazione diffusa attraverso una catena di blocchi in cui la rete informatica dei nodi costituita dagli edifici auto-produttori gestisce un registro di transazioni senza necessità di una entità centrale di controllo, raggiungendo obiettivi di decentralizzazione, tracciamento, disintermediazione, verifica e programmazione passando da un'internet dell'informazione a un'internet del valore.

### *I sistemi BIPV nell'integrazione fra azioni di adattamento e mitigazione climatica*

Un primo passo verso l'adattamento ai cambiamenti climatici è quello di ridurre la vulnerabilità e l'esposizione all'attuale variabilità climatica. Le strategie in questo campo includono azioni con ricadute positive anche nel perseguimento di altri obiettivi aumentando la resilienza verso una serie di possibili futuri scenari climatici, contribuendo a migliorare la salute umana, le condizioni di vita, il benessere sociale ed economico, e la qualità dell'ambiente [10].

Esistono significativi benefici comuni, sinergie e scambi tra le strategie di mitigazione e di adattamento: sforzi crescenti per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici comportano una crescente complessità di interazioni, come nel caso dell'energia [10]. Esempi di azioni che comportano benefici comuni includono l'aumento dell'efficienza energetica e di fonti energetiche più pulite, che portano alla riduzione delle emissioni di sostanze inquinanti che alterano il clima e sono dannose per la salute. I percorsi di maggiore resilienza ai cambiamenti climatici sono delle traiettorie di sviluppo sostenibile che combinano adattamento e mitigazione per limitare i cambiamenti climatici e i loro impatti.

Il futuro sarà determinato dal modo con cui ci adatteremo a una nuova realtà planetaria [12e]. La nuova condizione dovrà prevedere una modificazione dell'assetto urbano, in cui il *Building Integrated Photovoltaics* potrà essere una delle parti più rilevanti per trasformare gli edifici in micro-centrali produttrici di energia per adattarsi alle nuove infrastrutture energetiche.

## 2.2 Aspetti definatori e classificatori

In edilizia, gli impianti fotovoltaici si distinguono in base al tipo di integrazione architettonica.

Alla categoria BAPV - *Building Applied o Attached Photovoltaics* (in Italia “Fotovoltaico su edificio”) appartengono gli impianti indipendenti o sovrapposti all’involucro edilizio, che non svolgono alcuna funzione aggiuntiva rispetto alla produzione di energia elettrica e che possono essere applicati o rimossi senza compromettere alcun requisito costruttivo/tecnologico primario, essendo installati su strutture autonome di sostegno. Gli impianti di tipo BAPV sono suddivisi a loro volta in impianti *non integrati* e impianti *parzialmente integrati*, caratterizzati rispettivamente dall’assenza o presenza di complanarità dei moduli con l’estradosso della copertura (Figure 2 e 3).



Figura 2. Esempio di impianto BAPV non integrato installato su copertura piana [Fonte: ECO-ROOF].



Figura 3. Esempio di impianto BAPV parzialmente integrato installato su copertura inclinata [Fonte: VGS Italia].

Alla categoria BIPV - *Building Integrated Photovoltaics* (in Italia “FAI - Fotovoltaico Architettonicamente Integrato”) appartengono tutti i componenti della tecnologia fotovoltaica che costituiscono parte integrante dell’involucro edilizio, in sostituzione di prodotti da costruzione tradizionali (Figure 4 e 5). Questo significa che il componente o sistema di tipo BIPV diviene a tutti gli effetti un componente edile, che non può essere rimosso dall’edificio senza compromettere funzionalità primarie della stratificazione costruttiva o dell’intero sistema edilizio [17].



Figura 4. Esempio di impianto BIPV integrato su copertura inclinata [Fonte: EnergyGlass].



Figura 5. Esempio di impianto BIPV integrato su copertura inclinata [Fonte: SUNAGE].

Lo standard internazionale di riferimento EN 50583-1:2016 “Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules” [18], riferito ai moduli fotovoltaici utilizzati come prodotti da costruzione, stabilisce che questi ultimi sono considerati integrati nell’edificio se svolgono il ruolo di un componente costruttivo adempiendo ad una delle funzioni specificate dal Regolamento Prodotti da Costruzione CPR (*Construction Products Regulation*) 305/2011.

Tale definizione si riferisce principalmente al concetto tecnologico di “multifunzionalità”, secondo cui un modulo BIPV deve soddisfare requisiti connotanti aggiuntivi rispetto alla sola produzione di energia. Alcuni esempi:

- protezione dagli agenti atmosferici: pioggia, neve, vento, grandine;
- protezione dai raggi UV;
- isolamento termico;
- isolamento acustico e protezione dal rumore;
- rigidità, resistenza meccanica ed integrità strutturale;
- ombreggiamento/controllo della luce naturale.

A partire dallo Standard EN 50583-1:2016, nell’ambito dell’IEA PVPS Task 15, sono state sviluppate due distinte definizioni per “modulo (o prodotto) BIPV” e “sistema BIPV”, poiché il produttore del modulo generalmente non coincide con l’installatore del sistema e occorre dunque separare le rispettive sfere di responsabilità [17].

Un modulo (o prodotto) BIPV è insieme un modulo fotovoltaico e un prodotto da costruzione, progettato per essere un componente dell’edificio; in altre parole, è l’unità fotovoltaica più piccola e non divisibile (elettricamente e meccanicamente) in un sistema BIPV che conserva la funzionalità correlata all’edificio. Se il prodotto BIPV viene smontato, deve essere sostituito da un prodotto da costruzione appropriato in grado di espletare le medesime funzioni tecnologiche.

Un sistema BIPV è un sistema fotovoltaico in cui i singoli moduli fotovoltaici soddisfano la definizione di cui sopra per i prodotti BIPV; il sistema comprende i componenti elettrici necessari per collegare i moduli BIPV ai circuiti esterni e i sistemi di installazione e montaggio necessari per integrarli nell’organismo edilizio.

Lo standard internazionale di riferimento IEC 63092-1:2020 “Photovoltaics in buildings - Part 1: Requirements for building-integrated photovoltaic modules” [19] suddivide i sistemi BIPV in base al tipo di installazione in cinque categorie, secondo la combinazione dei criteri di integrazione nell’involucro edilizio, accessibilità e inclinazione (Tabella 1). La dicitura “non accessibile” implica che un altro prodotto da costruzione, installato al di sotto del modulo BIPV, impedisce il contatto diretto con la superficie interna del modulo e fornisce protezione contro gli urti meccanici e l’eventuale caduta di frammenti di grandi dimensioni all’interno dell’edificio, conseguente alla rottura accidentale del modulo.

**Tabella 1. Categorie di intervento secondo lo standard IEC 63092-1:2020.**

<p><b>Cat. A</b>    <b>Integrato nella copertura, non accessibile dall’interno dell’edificio</b></p> <p>I moduli BIPV sono installati con un angolo di inclinazione compreso tra 0° e 75° rispetto al piano orizzontale, con un altro prodotto da costruzione al di sotto.</p>	
<p><b>Cat. B</b>    <b>Integrato nella copertura, accessibile dall’interno dell’edificio</b></p> <p>I moduli BIPV sono installati con un angolo di inclinazione compreso tra 0° e 75° rispetto al piano orizzontale.</p>	
<p><b>Cat. C</b>    <b>Integrato nella facciata, non accessibile dall’interno dell’edificio</b></p> <p>I moduli BIPV sono installati con un angolo di inclinazione compreso tra 75° e 90° rispetto al piano orizzontale, con un altro prodotto da costruzione al di sotto.</p>	
<p><b>Cat. D</b>    <b>Integrato nella facciata, accessibile dall’interno dell’edificio</b></p> <p>I moduli BIPV sono installati con un angolo di inclinazione compreso tra 75° e 90° rispetto al piano orizzontale.</p>	
<p><b>Cat. E</b>    <b>Integrato esternamente, accessibile/non accessibile dall’interno dell’edificio</b></p> <p>I moduli BIPV forniscono un ulteriore livello funzionale. Es. parapetti, balaustre, pensiline, schermature, ecc.</p>	

### 2.3 Esperienze di ricerca alla scala edilizia e urbana

I primi sistemi fotovoltaici architettonicamente integrati, risalenti alla fine degli anni '70, consistevano perlopiù in prototipi sperimentali, dati gli alti costi di produzione delle celle fotovoltaiche che rendevano impraticabile la produzione industrializzata dei moduli su vasta scala. Solo sul finire degli anni '90, con il miglioramento dell'efficienza energetica delle tecnologie fotovoltaiche, parallelamente ad una prima spinta alla produzione industrializzata (che si concretizzerà però solo nella decade successiva), l'integrazione delle tecnologie fotovoltaiche nel progetto di architettura divenne oggetto di specifica trattazione in ricerche e studi di settore.

Nel nostro paese si parla per la prima volta di integrazione architettonica dei sistemi fotovoltaici nel "Conto Energia", un ambizioso programma di incentivi economici coordinato dal GSE, attivo dal 2005 al 2013, nato per favorire la diffusione del fotovoltaico in Italia; il Decreto premiava gli impianti riconoscibili come architettonicamente integrati mediante la rispondenza a specifici criteri di giudizio qualitativi e quantitativi contenuti in una guida; gli impianti parzialmente integrati potevano accedere ad una tariffa media, mentre i sistemi totalmente integrati erano incentivati con le tariffe più alte [20].

Tuttavia, l'integrazione auspicata dalla normativa non necessariamente comportava una valutazione dell'idoneità e della coerenza morfologica con l'organismo architettonico, limitandosi ad un'integrazione di tipo strutturale e tecnologico-funzionale, al fine di minimizzare l'effetto di estraneità del pannello sovrapposto alla morfologia dell'edificio.

Inoltre, il repertorio di possibili applicazioni proposte nelle linee guida del GSE, che corrispondeva di fatto alle modalità correnti con cui il fotovoltaico era integrato negli edifici italiani, ha ridotto la spinta all'innovazione di prodotto, di progetto o di processo che avrebbe potuto registrarsi nel settore del fotovoltaico architettonicamente integrato in quegli anni [21; 22].

Nonostante l'attuale panorama architettonico a scala nazionale e internazionale offra numerosi esempi progettuali in cui il fotovoltaico diviene parte integrante del processo progettuale, diversi studi hanno dimostrato come esistano ancora alcune barriere che limitano la diffusione delle tecnologie fotovoltaiche negli edifici e come spesso queste riguardino aspetti legati all'accettazione delle soluzioni utilizzate, specialmente sul piano della qualità architettonica [22]; il settore della produzione presenta ancora diverse difficoltà nel fornire soluzioni olistiche conformi alle principali richieste del mercato (estetica, flessibilità di progettazione e produzione, rapporto qualità-prezzo, ecc.).

Negli ultimi anni si osserva dunque una proliferazione di ricerche finalizzate a superare tali barriere e rendere pervasive le tecnologie fotovoltaiche architettonicamente integrate, definendo criteri e linee guida per una corretta integrazione architettonica e strategie per una diffusione massiva di tali sistemi sul mercato. In questo quadro, la sezione che segue fa riferimento agli esiti di alcuni tra i più interessanti studi sviluppati sul tema dei BIPV alla scala edilizia e urbana, di cui si è tenuto conto per l'elaborazione degli output del presente studio.

#### 2.3.1 Ricerche sull'integrazione architettonica dei BIPV alla scala edilizia

L'*International Energy Agency* (IEA)<sup>2</sup>, nell'ambito del *Technology Collaboration Programme* (TCP)<sup>3</sup>, ha

<sup>2</sup> L'*International Energy Agency* - (IEA, in Italia Agenzia internazionale per l'energia - AIE) è un'organizzazione internazionale intergovernativa fondata nel 1974 dall'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OCSE) in risposta alle interruzioni dell'approvvigionamento di petrolio; lo scopo dell'agenzia è quello di facilitare il coordinamento delle politiche energetiche dei paesi membri per assicurare la stabilità degli approvvigionamenti energetici, promuovere e sviluppare le fonti alternative di energia, razionalizzare le politiche energetiche e coordinare la ricerca multinazionale su nuove fonti di energia.

<sup>3</sup> Il *Technology Collaboration Programme* (TCP) è composto da esperti provenienti dal governo, dal mondo accademico e dall'industria, uniti dall'obiettivo comune di collaborazione globale sui temi della sicurezza energetica, sostenibilità e applicazione di specifiche tecnologie energetiche. Il programma generale è guidato da un Comitato Esecutivo, composto da un rappresentante esperto per ciascun paese o membro dell'organizzazione, che designa "Task" distinti, che possono essere progetti di ricerca o aree di attività.

stabilito due programmi sul tema del fotovoltaico, il *Solar Heating and Cooling Program (SHC)*<sup>4</sup> e il *Photovoltaic Power Systems Program (PVPS)*<sup>5</sup>, all'interno dei quali, negli ultimi dieci anni, sono stati sviluppati alcuni tra i più rilevanti progetti di ricerca (Task) relativi alla corretta integrazione e diffusione dei sistemi solari attivi nel settore edile; all'interno di ciascun Task vengono svolte numerose pubblicazioni, conferenze, workshop, valutazioni di mercato e studi internazionali e interdisciplinari, con l'obiettivo di raccogliere e diffondere conoscenze e informazioni sullo stato attuale e le tendenze dell'industria fotovoltaica.

Nell'ambito del programma IEA SHC, il primo progetto sul tema dei BIPV, nonché punto di partenza per gli studi successivi, è il Task 41 - *Solar Energy and Architecture (2009-2012)* [23], che definisce la qualità dell'integrazione architettonica dei sistemi solari attivi come risultato di un'interazione controllata e coerente con il manufatto architettonico basata su tre livelli: funzionale, costruttivo ed estetico-formale, [24]. Gli esiti del progetto consistono in un catalogo di casi studio e prodotti innovativi BIPV, classificati per elementi costruttivi, e in un doppio ordine di criteri e raccomandazioni sulla corretta integrazione architettonica dei dispositivi *building integrated photovoltaic (BIPV)* e *building integrated solar thermal (BIST)*, destinate ai progettisti e alle aziende produttrici, al fine di soddisfare una nuova domanda di qualità ampliando e migliorando l'offerta produttiva [25].

Lo studio si fonda in parte sulle ricerche effettuate a partire dal 2004 all'interno dell'EPFL - École Polytechnique Fédérale de Lausanne, in cui venivano individuati criteri condivisi dai professionisti dell'architettura finalizzati a determinare la qualità dell'integrazione architettonica dei sistemi solari attivi (termici e fotovoltaici) incorporati nell'involucro edilizio [26]. Tali criteri, recepiti dal Task 41, fanno riferimento alla multifunzionalità dell'elemento costruttivo e alla coerenza delle caratteristiche formali dei sistemi solari con il concept progettuale, coinvolgendo forma e dimensioni del modulo, la sua posizione nell'involucro edilizio, materiali visibili, pattern, texture, colori delle superfici e modalità di giunzione e connessione [24].

Altri interessanti progetti nati all'interno dell'SHC Program sono il Task 40 e il Task 56, rispettivamente riferiti alle tecnologie solari innovative alla scala di progetto e di prodotto. Il Task 40 - *Net Zero Energy Solar Buildings (2008-2013)* [27] si focalizza sugli edifici con integrazione di componentistica solare ad energia netta zero (o quasi zero), al fine di sviluppare un framework di definizioni, conoscenze comuni, strumenti atti allo studio degli NZEBs (Net Zero Energy Building), soluzioni innovative e linee guida per le industrie. In particolare, il Subtask B si pone come obiettivo l'analisi degli strumenti utili alla progettazione, approfondendo casi studio ed esempi rilevanti di NZEBs, e identificando una suite di strumenti atti al supporto della fase progettuale. Il Task 56 - *Building Integrated Solar Envelope Systems (2016-2020)* [28] affronta l'analisi, la simulazione e il monitoraggio di sistemi di involucro edilizio industrializzati che includono elementi di controllo e impiego dell'energia solare, con lo scopo di produrre energia termica e/o elettrica rinnovabile e ridurre le richieste di riscaldamento e raffreddamento degli edifici, controllando la luce diurna in ingresso. Tra gli esiti della ricerca, di particolare interesse risulta l'analisi SWOT<sup>6</sup> condotta su alcuni sistemi solari attivi presenti sul mercato, da cui si ricavano interessanti conclusioni sulle criticità e su futuri trend della produzione BIPV.

Tra i progetti IEA SHC che nei prossimi anni potrebbero produrre interessanti risultati, occorre menzionare il Task 66 - *Solar Energy Building (2021-2024)* [29], incentrato sullo sviluppo di dispositivi economici ed ecologici per la fornitura energetica con elevate frazioni solari (termica ed elettrica), concepiti per essere integrati in

---

<sup>4</sup> Il *Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Program (IEA-SHC TCP)*, istituito nel 1977, è uno dei primi programmi dell'Agenzia internazionale per l'energia finalizzato a promuovere l'uso di tutti gli aspetti dell'energia solare.

<sup>5</sup> Il *Photovoltaic Power Systems Technology Collaboration Program (IEA-PVPS TCP)*, istituito nel 1993, nasce con l'obiettivo di potenziare gli sforzi di collaborazione internazionale che facilitano il ruolo dell'energia solare fotovoltaica nella transizione verso sistemi energetici sostenibili.

<sup>6</sup> L'analisi SWOT è un noto metodo di analisi di prodotto (o aziendale), il cui scopo è assistere la pianificazione strategica di un'azienda fornendo una panoramica sulle questioni interne ed esterne che hanno un impatto sul successo del prodotto. Il processo prevede l'identificazione dei punti di forza (S) e di debolezza (W) del prodotto, nonché delle opportunità (O) di crescita e delle minacce (T) presentate dall'ambiente esterno. Più specificamente, i punti di forza e di debolezza sono fattori che hanno un'origine interna su cui esiste una certa misura di controllo. Le opportunità e le minacce sono fattori esterni che difficilmente è possibile influenzare [28].

edifici residenziali esistenti o di nuova realizzazione, unifamiliari, multipiano, a blocco o costituenti intere porzioni di città (comunità).

Nell'ambito del programma IEA PVPS, il primo progetto avviato sul tema del fotovoltaico integrato negli edifici è il Task 7 - *Photovoltaic power systems in the built environment* (1997-2001) [30], con l'obiettivo di migliorare la qualità architettonica, la qualità tecnica e la fattibilità economica dei sistemi fotovoltaici nell'ambiente costruito e valutare e rimuovere le barriere alla loro diffusione. Il progetto definisce alcuni criteri architettonici per la valutazione della qualità della tecnologia fotovoltaica negli edifici: *integrazione naturale* (il sistema FV è parte integrante dell'edificio, lo completa); *gradevolezza architettonica* (il sistema FV presenta caratteristiche accattivanti); *buona composizione* (il colore e la struttura del sistema fotovoltaico sono in armonia con gli altri materiali); *griglia, armonia e composizione* (il dimensionamento dell'impianto fotovoltaico corrisponde al dimensionamento e alla griglia dell'edificio); *contesto* (l'immagine complessiva dell'edificio è in armonia con il sistema fotovoltaico); *qualità del progetto* (ossia dei dettagli costruttivi); *design innovativo* [31; 32]. I criteri individuati dal Task 7, sebbene abbiano il merito di avere aperto una strada sul tema della valutazione della qualità dell'integrazione architettonica, risentono di un approccio ancora non del tutto maturo, basato su considerazioni qualitative e soggettive; inoltre, la qualità architettonica viene analizzata solo tenendo conto degli aspetti riguardanti il suo risultato estetico, senza tener conto di quelli funzionali e costruttivi.

Attualmente, il progetto sui BIPV di maggiore rilevanza e interesse per la ricerca, avviato a circa un ventennio di distanza dal Task 7, è senza dubbio l'IEA PVPS Task 15 - *Enabling Framework for the Development of BIPV* (2019-2023) [33], il cui obiettivo è creare un framework entro cui accelerare la penetrazione dei prodotti BIPV nel mercato globale delle energie rinnovabili, con conseguente parità di condizioni per i prodotti BIPV, i prodotti BAPV e i componenti tradizionali dell'involucro edilizio. Le attività del Task riguardano sia edifici nuovi che esistenti, diverse tecnologie fotovoltaiche e diverse scale e modalità di applicazioni. Di particolare interesse è la raccolta di casi studio, oggetto di approfondimento nel paragrafo 2.3.3, e l'elaborazione di linee guida per l'integrazione dei sistemi BIPV, attualmente in corso di stesura.

Oltre ai programmi su riportati, la letteratura tecnico scientifica ha prodotto numerose linee guide e raccomandazioni per la corretta progettazione e integrazione dei sistemi solari attivi per il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici storici, di pregio, o collocati in contesti sensibili. Il centro della questione che emerge nelle ricerche non è più sull'essere a favore o contro l'uso dei sistemi solari attivi nelle città, ma piuttosto definire livelli locali appropriati di qualità dell'integrazione, identificando i fattori necessari per avviare politiche di energia solare intelligente, in grado di preservare la qualità dei contesti urbani preesistenti promuovendo l'uso dell'energia solare [34].

I progetti nazionali svizzeri *Sustainable Renovation of Historical Buildings* - SuRHiB (Figura 6) [35], ENBAU-ENergie und BAUdenkmal [36] e il progetto europeo 3encult [37], definiscono criteri, linee guida semplificate e schede tecniche per effettuare una valutazione dell'integrazione architettonica dei sistemi fotovoltaici in contesti sensibili per garantire risultati progettuali soddisfacenti.

Gli aspetti comuni alle diverse ricerche, ritenuti fondamentali per ottenere una buona integrazione, possono essere sintetizzati come segue [38; 39]:

- complanarità e aderenza dei moduli alla copertura;
- rispetto delle linee e dei contorni della copertura (colmi, canali e gronde);
- raggruppamento dei moduli;
- rispetto della forma e delle proporzioni della falda;
- cura dei dettagli e degli elementi di raccordo;
- scelta di forme e colori nel rispetto della copertura preesistente.



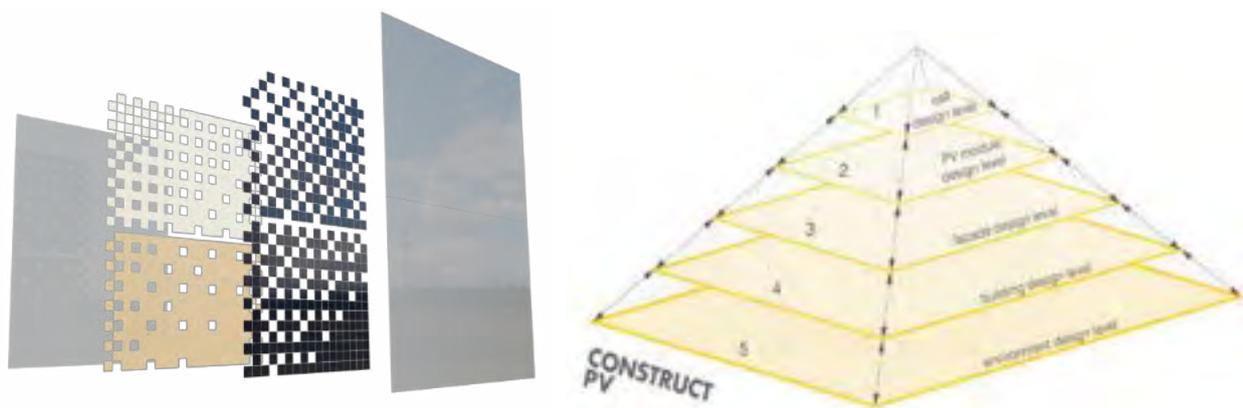
**Figura 6. Progetto SuRHiB. Quadro sinottico relativo alla compatibilità dei criteri e raccomandazioni con le diverse tipologie di involucro rilevate sul territorio ticinese [Fonte: SUPSI - ISAAC].**

I criteri suesposti fanno riferimento ad una progettazione attenta ai caratteri dei luoghi e dell'architettura; ma mentre fino a pochi anni fa buona parte delle soluzioni proposte era oggetto di un sistematico diniego da parte degli organismi di controllo, risentendo dei limiti di un'offerta produttiva limitata e standardizzata, grazie ai nuovi prodotti BIPV presenti sul mercato, personalizzabili nella forma, nel colore e nelle tessiture, del tutto simili ai tradizionali materiali dell'architettura, è oggi possibile proporre soluzioni caratterizzate da un'elevata compatibilità architettonica e dunque accoglibili favorevolmente.

In relazione alle ricerche europee finanziate nell'ambito del Settimo Programma Quadro di Ricerca Scientifica e Tecnologica dell'UE (7PQ) e del Programma Quadro europeo per la Ricerca e l'Innovazione Horizon 2020 (H2020), si possono citare alcuni dei progetti più recenti e dagli esiti più rilevanti per i fini della presente ricerca.

Il progetto di ricerca Construct-PV - *Electrically Tested BIPV Slates for Facade or Roof* (7PQ, 2013-2018) [40] punta a sviluppare e dimostrare l'uso di sistemi fotovoltaici integrati personalizzabili, multifunzionali, efficienti e a basso costo destinati all'involucro edilizio opaco, in regione del potenziale di producibilità energetica non sfruttato in tutta Europa. Il consorzio del progetto, comprendente leader di fama internazionale nei settori fotovoltaico e delle costruzioni, oltre a diversi istituti di ricerca (tra cui ENEA) e uno studio di architettura, ha come obiettivo lo sviluppo di un catalogo di moduli BIPV vetro-vetro dalle infinite potenzialità estetico-formali; utilizzando la ricerca di mercato in combinazione con le potenzialità offerte dalle più recenti tecnologie fotovoltaiche, il modulo standard generico può essere convertito in una serie di opzioni progettuali "su misura" per le diverse esigenze dei consumatori, mediante la stratificazione di layer (vetro anteriore, celle, backsheet, interlayer) dal design, colori e finiture variabili [41] (Figura 7). Gli esiti del Progetto sono destinati in particolare alle PMI, per far sì che possano avviare una produzione locale di massa di prodotti BIPV personalizzati e competitivi sul mercato, a fronte di costi ragionevoli.

Il progetto di ricerca PVSITES - *Building-Integrated photovoltaic technologies and systems for large-scale market deployment* (H2020, 2016-2019) [42] nasce con l'obiettivo di guidare le tecnologie BIPV verso una vasta diffusione sul mercato, fornendo una risposta forte e affidabile alle esigenze identificate dai membri del consorzio, appartenenti al mondo dell'industria; la metodologia della ricerca prevede la dimostrazione di un ampio repertorio di prodotti BIPV sperimentali ad alta efficienza, basati su tecnologie fotovoltaiche in silicio cristallino e film sottile in CIGS, integrati in sei edifici reali (dimostratori), coprendo diversi mercati, climi, destinazioni d'uso (residenziale, industriale, commerciale, di proprietà pubblica o privata), di modo da poter essere replicati in diversi contesti.



**Figura 7. Possibilità di realizzare moduli custom grazie alla stratificazione di layer caratterizzati da diversi colori, texture, pattern, Construct-PV [Fonti: Construct-PV; UNStudio].**

Il progetto di ricerca BIPVBOOST - *Bringing down the cost of multifunctional BIPV systems* (H2020, 2018-2022) [43] ha come obiettivo l'implementazione di una roadmap per la riduzione dei costi a breve e medio termine delle soluzioni fotovoltaiche integrate negli edifici e dei relativi processi produttivi lungo l'intera *value chain*, verificandone la conformità con i principali requisiti di mercato. Il progetto attualmente è in fase di sviluppo di una linea di produzione flessibile e automatizzata per la realizzazione di un sistema fotovoltaico integrato, con attenzione alla standardizzazione e alla conformità normativa, per consentire una rapida e massiccia diffusione dei prodotti BIPV sul mercato, a fronte di una significativa riduzione dei costi.

Il progetto di ricerca BE-SMART (H2020, 2018-2022) [44] si pone l'obiettivo di contribuire all'implementazione delle politiche europee di progettazione e realizzazione di edifici a energia zero, mediante il supporto all'industrializzazione di nuovi materiali e ai processi di produzione, più snelli e automatizzati, di elementi BIPV innovativi e multifunzionali. Il raggiungimento di una sostanziale riduzione dei costi dei BIPV nel settore edile offre all'industria europea l'opportunità di differenziare i propri prodotti dai moduli FV standardizzati, a basso costo o di scarso valore, fornendo soluzioni di valore "premium"; viene così proposto il concetto di *Energy Positive Glazing* (EPoG o E+Glazing) in sostituzione del termine BIPV, per indicare "Vetri e Finestre Smart Elettricamente Attivi" dalle possibilità di design quasi illimitate e dall'ampia gamma di colori e finiture.

Oltre ai progetti sopra menzionati, i cui output sono già del tutto o in parte disponibili, sebbene avviato solo di recente, risulta degno di menzione il progetto di ricerca europeo INFINITE - *Industrialised Durable Building Envelope Retrofitting By All-In-One Interconnected Technology Solutions* (H2020, 2020-2025) [45], coordinato dal Centro di ricerca privato EURAC Research, con sede a Bolzano, che punta alla decarbonizzazione del patrimonio edilizio esistente dell'UE mediante la diffusione nel mercato dei prodotti-kit industrializzati sostenibili per l'involucro edilizio, destinati alla deep renovation, con casi dimostratori reali in Italia, Francia e Slovenia. Il progetto illustra i vantaggi della Renovation4.0 (industrializzazione + digitalizzazione) mediante sistemi e componenti industrializzati di nuova generazione; tra questi, saranno sviluppati prodotti kit BIPV per la generazione energetica, finalizzati alla riduzione dei costi e all'ottimizzazione estetica. Rispetto ai metodi costruttivi tradizionali, la prefabbricazione offre numerosi vantaggi, come la riduzione dei tempi realizzativi, dei costi produttivi e una migliore qualità del prodotto.

Tra le più interessanti iniziative europee con ricadute a livello nazionale, ancorché non correlate con il topic dell'integrazione architettonica, il network PV Impact (H2020, 2019-2022) [46], avviato da CNR, Enel Green Power ed EURAC Research in collaborazione con aziende del settore, ha l'obiettivo di monitorare lo sviluppo del settore fotovoltaico, verificando il raggiungimento degli obiettivi posti nel rispetto dei target fissati dalla COP21 di Parigi sui cambiamenti climatici. L'impegno richiesto per l'Italia è il passaggio entro il 2030 dagli attuali 24TWh/anno di energia generata dal solare fotovoltaico a 75TWh/anno, ovvero circa il 25% della domanda totale di energia elettrica del Paese. La metodologia di lavoro prevede la raccolta dei dati relativi alla spesa pubblica e privata in Italia, ai diversi progetti finanziati e alle prestazioni complessive della

tecnologia fotovoltaica, in modo da poter stimare le possibili spese future a seconda dei diversi scenari; sarà dunque effettuata una verifica periodica dei miglioramenti nelle prestazioni della tecnologia, fornendo raccomandazioni alle autorità di finanziamento europee e dei vari stati membri su come riportare l'industria fotovoltaica europea ai vertici.

Infine, a livello nazionale, occorre menzionare l'Istituto per le Energie Rinnovabili dell'EURAC Research, che da anni conduce attività di ricerca applicata nel campo di sistemi energetici avanzati che prevedono l'utilizzo di fonti energetiche sostenibili, con l'obiettivo di stimolare il settore edile verso l'utilizzo della tecnologia fotovoltaica, superando gli attuali ostacoli e attuando un approccio multidisciplinare che si focalizza sull'integrazione estetica, energetica e tecnologica dei sistemi BIPV.

Un interessante progetto di ricerca nato in collaborazione tra l'Istituto EURAC (capofila italiano), la SUPSI - Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (capofila svizzero) e la Regione Lombardia (oltre ad una serie di partner appartenenti ai settori industriale e delle politiche energetiche) è *BIPV meets History* [47], che punta a creare nuove prospettive di business per la filiera della tecnologia fotovoltaica integrata per il recupero del patrimonio edilizio esistente, rispondendo alle politiche europee, nazionali e locali e garantendo il rispetto dei valori paesaggistici e architettonici.

Il progetto evidenzia le opportunità offerte dai sistemi BIPV nel risanamento edilizio del territorio transfrontaliero Italia-Svizzera, definisce una metodologia comune e facilita la discussione sulle problematiche e barriere che rallentano il processo di diffusione dei sistemi BIPV nel paesaggio e nel patrimonio edilizio esistente. L'idea di fondo è che la conoscenza delle tecnologie solari fotovoltaiche integrate e delle buone pratiche realizzate sia indispensabile per costruire meglio, in modo più efficiente e in armonia con le stratificazioni storiche del territorio e del paesaggio [48].

### 2.3.2 Ricerche europee alla scala urbana

Quando si affronta il tema dell'integrazione BIPV a scala urbana le principali ricerche europee si concentrano tendenzialmente su tre ambiti: gli insediamenti da pianificare ex novo, i contesti urbani esistenti e quelli caratterizzati da particolari valenze architettonico/ambientali [49; 50]. Ai fini della ricerca sono qui approfonditi gli approcci e i metodi sviluppati in ricerche e progetti europei che si sono confrontati con il tema degli insediamenti urbani esistenti, rispetto ai quali urgenti interventi di mass retrofit devono essere necessariamente associati a una diffusa generazione di energia rinnovabile per raggiungere i target di decarbonizzazione fissati dall'UE per il 2050.

Alla scala urbana la complessità dell'ambiente costruito influenza sensibilmente l'incidenza dell'irradiazione solare sulle superfici degli edifici creando scenari non ottimali per i sistemi BIPV (ad esempio con fenomeni di ombreggiamento parziale o di surriscaldamento a causa della presenza di *hot spots* localizzati), con possibili perdite di potenza, condizioni di funzionamento non ottimali, o effetti di riduzione della sicurezza e della durata [51]. Un'analisi preliminare del potenziale solare e dell'ombreggiamento è quindi fondamentale per valutare correttamente la potenziale producibilità da sistemi BIPV. L'affidabilità delle stime sulla potenziale producibilità energetica a scala urbana si rileva assai inferiore rispetto a quella ottenuta a scala del singolo edificio, con livelli di dettaglio delle analisi limitati in termini di geometria ma anche di irraggiamento previsto sul piano dell'array. Tale divario è dovuto principalmente a due fattori: la mancanza di dati accurati disponibili in ambito urbano e le elevate capacità computazionali necessarie per le simulazioni su larga scala.

Innovativi metodi e strumenti sono stati introdotti nella progettazione a scala urbana grazie anche ai recenti progressi nel telerilevamento e nella modellazione 3D delle città, nonché all'integrazione di tali dati in complessi sistemi di supporto decisionale spaziale, solitamente basati su piattaforme GIS.

Le mappe solari, o catasti solari, sono gli strumenti più diffusi [52; 53] per fornire informazioni sull'idoneità di una determinata superficie di un edificio per l'installazione di sistemi BIPV quando si fa riferimento a insediamenti esistenti: consentono di definire a una scala meta-progettuale l'individuazione delle superfici più adatte per le installazioni di sistemi solari e permettono di quantificare il relativo potenziale di produzione di energia. La maggior parte delle mappe solari sviluppate in ambito europeo (Figura 8) sono basate su dati geometrici (relativi a edifici, terreno, vegetazione) ottenuti

Area	Nr	City/Country	Analyzed Building Envelope Elements	Solar System	Module Efficiency/Energy Output	Categories	Solar Irradiation Ranges (kWh/m <sup>2</sup> /year)	Base for Categories
North Europe	1	Norway	Roofs	PV	PV: 14%/Yes	Unsuitable Suitable Very suitable	N/A	Solar irradiation, roof geometry
	2	Stockholm, Sweden	Roofs	PV/ST	PV: 14%/Yes ST: 30%/Yes	Hesitant Promising Excellent	<950 950-1000 >1000	Solar irradiation, roof geometry
	3	Copenhagen, Denmark	Roofs	N/A	N/A	Not good Reasonable Good Very good	N/A	Solar irradiation
Central Europe	4	Berlin, Germany	Roofs	PV	12%/Yes	Reasonable Good Very good	<950 950-1035 1035-1090	N/A
	5	Bristol, United Kingdom	Roofs	PV	N/A/Yes	Reasonable Good Very good	<950 950-1000 >1000	Solar irradiation
	6	Vienna, Austria	Roofs	PV/ST	PV: 14%/Yes ST: 30%/Yes	Good Very good	900 < 1200 >1200	Solar irradiation
	7	Switzerland	Roofs	PV/ST	PV: 17%/Yes (PV both for façades and roofs) ST: varies based on statistical data	Low Medium High Very high Excellent	<950 800-1000 1000-1200 1200-1400 >1400	Solar irradiation, roof geometry
			Facades			Low Medium High Very high Excellent	<600 600-800 800-1000 1000-1200 >1200	
	8	Geneva, Switzerland		PV/ST	N/A	Favourable Very favourable	<1200 >1200	Solar irradiation, roof geometry
	9	Lyon, France	Roofs	PV	PV: 13.5%/Yes	Bad Low Average Very good Good Excellent	<900 750-850 850-950 950-1100 1100-1250 1250-1544	Solar irradiation, roof geometry
	10	Amiens, France	Roofs	PV	PV: 13.5%/Yes	Bad Fair Waj Good Very good Excellent	<1000 1000-1166 1166-1238 1238-1311 1311-1384 >1384	Solar irradiation
	11	Bordeaux, France	Roofs	PV	N/A	Fair Good Excellent	1000-1230 1230-1390 1390-1540	Solar irradiation
	12	Bolzano	Roofs	PV	Cadmium telluride photovoltaics and poly crystalline silicon/Yes	NA	<950 900-1000 1000-1200 >1200	Solar irradiation, roof geometry
South Europe	13	Ravenna, Italy	Roofs	PV/ST	N/A	Low Average Very good Good Excellent	<950 900-800 800-1100 1100-1400 >1400	Solar irradiation
	14	Lisbon, Portugal	Roofs	N/A	N/A	Class I Class II Class III Class IV	<1000 1000-1400 1400-1600 >1600	Direct solar irradiation, roof geometry
	15	Vila-real-Gaiborra, Portugal	Roofs	N/A	N/A	Class A Class B Class C Class D Class E Class F Class G	0-5% 5-10% 10-20% 20-30% 30-40% 40-50% >50%	Solar potential

PV: Photovoltaic; ST: Solar thermal; N/A: data not available.

Figura 8. Catasti solari e mappature urbane nel panorama europeo [52].

attraverso dati di rilevamento LiDAR (*Light Detection And Ranging*), con processi che possono quindi essere eseguiti automaticamente su aree urbane su larga scala con alta precisione considerando le topografie delle superfici, le misurazioni dell'irradiazione diretto e diffuso a lungo termine e le influenze delle ombre portate. Le informazioni 3D si concentrano invece sull'analisi dell'irradiazione e sulla produzione di energia dei sistemi fotovoltaici (PV)<sup>7</sup> e talvolta sulla produzione del solare termico (ST).

In ambito europeo numerose città<sup>8</sup> si sono dotate di catasti solari al fine di promuovere una installazione diffusa e consapevole di moduli fotovoltaici o pannelli solari termici. Alcuni progetti si sono spinti oltre la scala comunale confrontandosi con la possibilità di calcolare il potenziale solare a livello di distretto e fino alla scala nazionale.

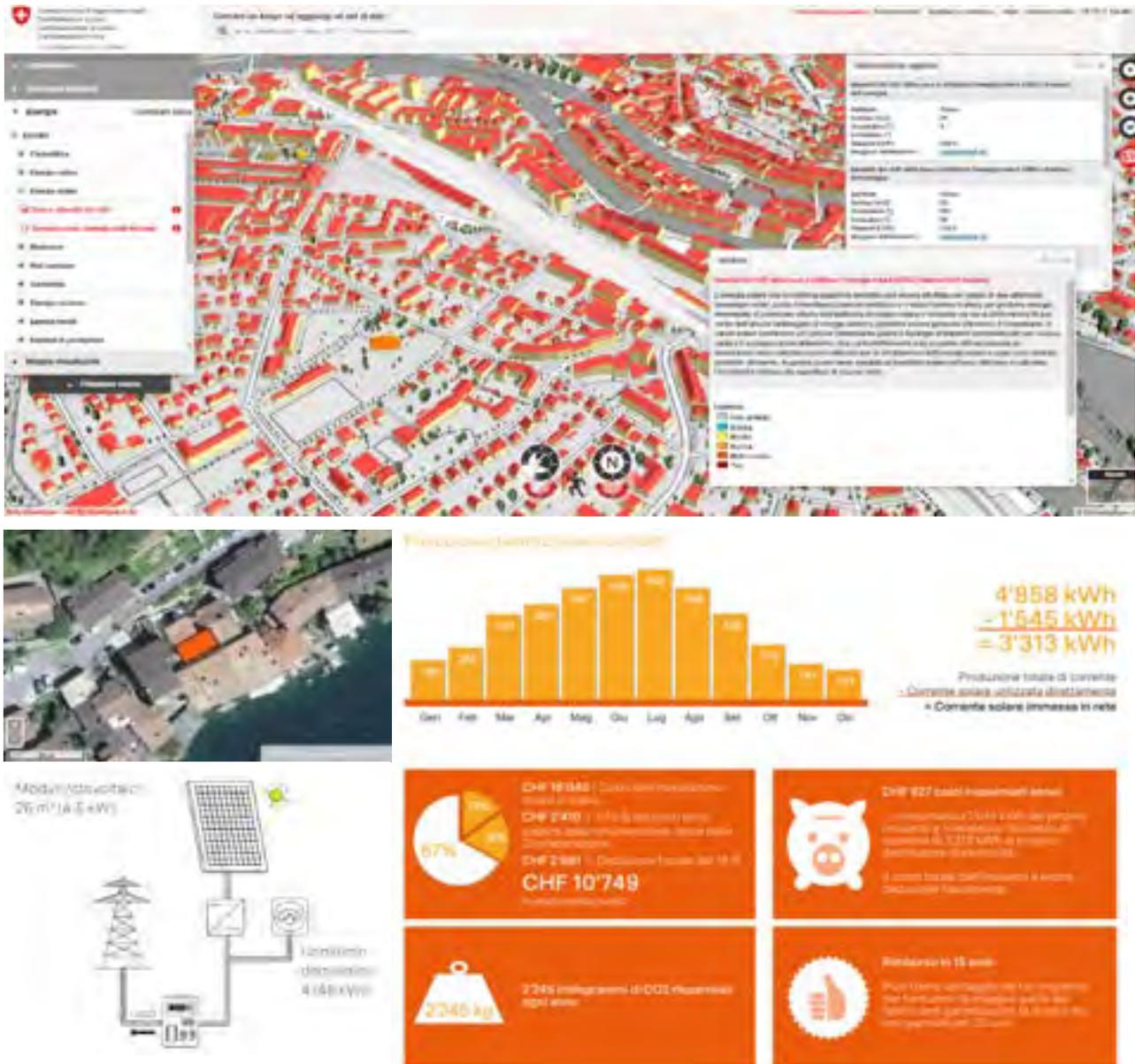


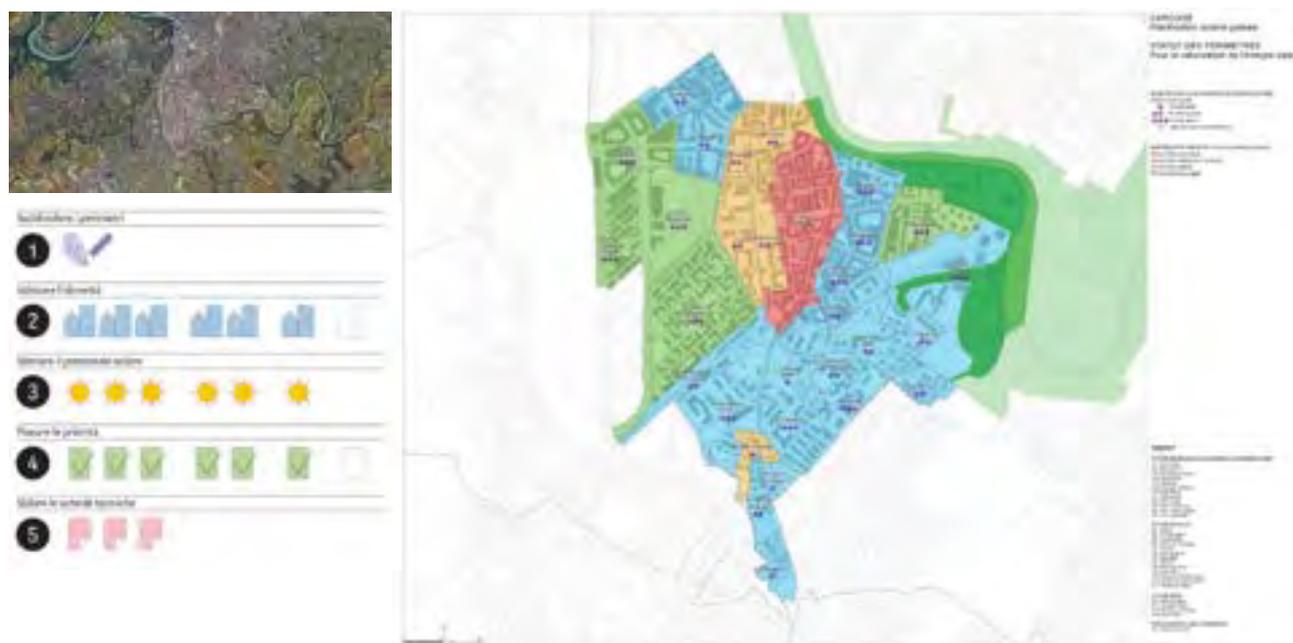
Figura 9. Il catasto solare svizzero e la simulazione della produzione in copertura attraverso il tool *tettosolare.ch*.

<sup>7</sup> I dati di output per il potenziale fotovoltaico comprendono di norma l'irraggiamento medio in un punto centrale delle superfici della copertura o della facciata selezionata (kWh/m<sup>2</sup> anno) e l'insolazione totale (kWh/anno) che, moltiplicata per i fattori di prestazione della tecnologia fotovoltaica prevista, fornisce la produzione (kWh/anno).

<sup>8</sup> A titolo di esempio è possibile consultare il catasto solare del Comune di Morgex (link: <http://www.morgexsolare.it/>), quello del Comune di Vienna (link: <https://www.wien.gv.at/umweltgut/public/grafik.aspx?ThemePage=9>) o, il primo in Italia, quello del Comune di Mantova (link: [http://sit.comune.mantova.it/siticloud/SitiCatastoCloud.jsp#TAB\\_0](http://sit.comune.mantova.it/siticloud/SitiCatastoCloud.jsp#TAB_0)).

Appartiene alla prima categoria il progetto Solar Tirolo<sup>9</sup> in cui il Solar WebGIS sviluppato costituisce un catasto solare unico per Alto Adige e Tirolo. Il progetto ha costituito un importante avanzamento nella valutazione del potenziale solare su ampia scala in territori complessi come quello delle Alpi, dove solitamente le banche dati hanno una risoluzione troppo bassa e per le applicazioni locali sono poco adatti a riprodurre le condizioni specifiche (ombreggiamento o peculiarità meteorologiche locali). Nel progetto è stato elaborato un ampio set di dati sulla radiazione solare che rispecchia le peculiarità spaziali del terreno; tuttavia, a causa della risoluzione limitata (griglie da 100mx100m) non si rivela adeguato al calcolo del potenziale solare degli edifici, quanto piuttosto a una valutazione di pianificazione territoriale per strategie energetiche a lungo termine.

Uno degli esempi più avanzati di mappatura solare che si confronta con una scala nazionale è stato realizzato in Svizzera: si tratta di un progetto congiunto fra l'Ufficio federale dell'energia (UFE), l'Ufficio federale di topografia (swisstopo) e l'Ufficio federale di meteorologia e climatologia (MeteoSvizzera) che ha portato allo sviluppo di una piattaforma web riferita all'intero territorio nazionale. La mappa, consultabile in 2D e 3D, permette la visualizzazione interattiva dei valori di irradiazione solare sia sui tetti che sulle facciate degli edifici, la categorizzazione dei risultati dell'irraggiamento, la disponibilità delle potenziali produzioni di PV e ST, e una visualizzazione *user-friendly* dei dati di output (Figura 9). Tale risultato è stato raggiunto anche grazie al web tool realizzato all'interno del programma SvizzeraEnergia mirato al calcolo dello specifico rendimento di sistemi fotovoltaici sulle coperture e le facciate<sup>10</sup>.



**Figura 10. Il metodo in 5 step per l'identificazione delle aree idonee per integrazioni BIPV sperimentato nella città di Carouge [54].**

Nonostante il rapido aumento degli strumenti software che permettono di calcolare e misurare il livello di radiazione solare sulle superfici esistenti a scala urbana, si rileva un gap nello sviluppo di approcci e metodi per integrare tali dati nei processi di pianificazione tradizionali. Fra le ricerche più interessanti che si sono mosse in tale direzione è possibile citare un progetto pilota promosso in Svizzera dall'Ufficio federale della cultura (UFC) in collaborazione con il Cantone di Ginevra e la Città di Carouge, volto a conciliare la

<sup>9</sup> Solar Tirolo è un progetto che comprende il territorio transfrontaliero composto dalla Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige e dal Land Tirolo. Si tratta di un progetto inserito nel programma di sviluppo Interreg IV Italia-Austria (2007-2013) che ha promosso la cooperazione territoriale europea. Il Solar WebGIS è raggiungibile all'indirizzo: <http://webgis.eurac.edu/solartirolo/?lang=ita>.

<sup>10</sup> Il catasto svizzero del potenziale solare è accessibile al link: <https://s.geo.admin.ch/7cab96d7ab>. I tool dedicati alla simulazione di impianti FV su coperture e facciate sono invece disponibili su [tettosolare.ch](http://tettosolare.ch) e [facciatasolare.ch](http://facciatasolare.ch).

salvaguardia del patrimonio costruito e la promozione dell'installazione di sistemi solari<sup>11</sup>. Il metodo proposto può essere semplificato in cinque step (Figura10):

1. suddivisione dell'area della Città di Carouge in perimetri, caratterizzati da tessuti urbani relativamente omogenei;
2. analisi rispetto a ciascun perimetro delle caratteristiche urbanistiche, architettoniche e patrimoniali, e valutazione dell'idoneità all'integrazione di soluzioni PV/ST;
3. simulazione per ciascun perimetro del potenziale solare;
4. definizione dei perimetri su cui intervenire con integrazioni di soluzioni PV/ST in modo prioritario rispetto a valutazioni di tipo economico, energetico e di salvaguardia dei caratteri architettonici;
5. produzione di schede tecniche di output.

L'obiettivo della ricerca è quello di definire le aree in cui, data l'assenza di specifici vincoli o edifici di significativo valore storico-architettonico, mettere in atto aggiornamenti degli strumenti di pianificazione urbanistica, semplificando le procedure per la realizzazione di impianti PV/ST sia da parte dei privati che della pubblica amministrazione.

Anche la metodologia LESO-QSV<sup>12</sup> (Laboratoire d'Énergie SOLAIRE - Qualité-Sensibilité-Visibilité) si confronta con il tema della necessaria integrazione di sistemi fotovoltaici a scala urbana attuata preservando la qualità dei contesti urbani preesistenti, proponendo un metodo di valutazione basato su una serie di criteri derivati dalla letteratura preesistente [34]. Il metodo si basa sul nuovo concetto di "criticità architettonica" delle superfici urbane e stabilisce il grado di accettabilità dei pannelli solari in base alla sensibilità del sito e alla visibilità dei moduli dallo spazio pubblico (Figura 11). Più è alto il livello di "criticità" – come, ad esempio, nel caso nella facciata di un edificio storico – più vi è la necessità di una progettazione integrata armonica. Più è basso, come nel caso di un tetto piatto di una fabbrica in un'area industriale, meno ci sarà bisogno di puntare su strategie di integrazione. Il metodo valuta gli impianti fotovoltaici attraverso tre criteri oggettivi con cui valutare come inserire l'impianto nel contesto urbano: la geometria del progetto, la materialità e la struttura modulare.



**Figura 11. LESO-QSV: livelli di criticità architettonica. [34].**

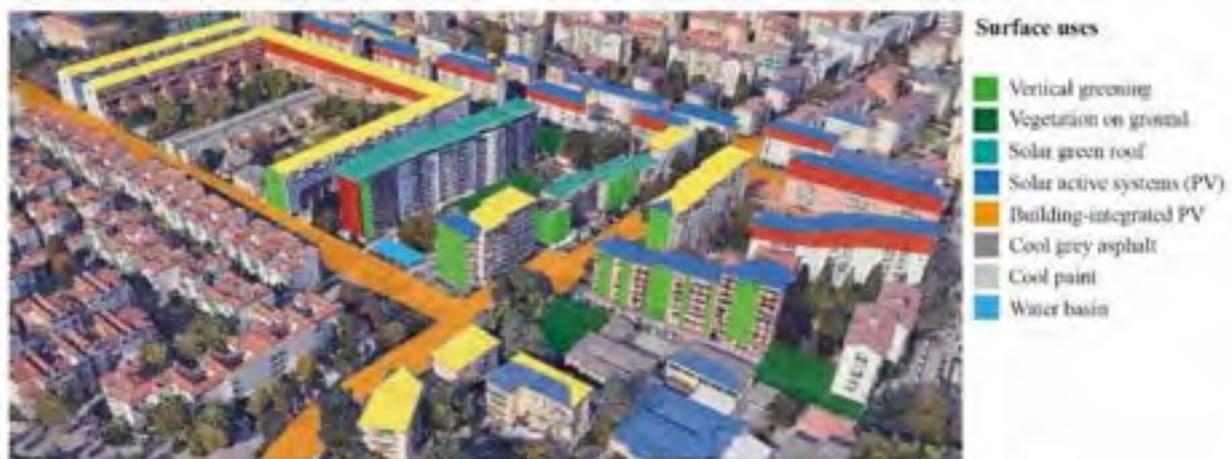
<sup>11</sup> L'Ufficio federale della cultura ha incaricato una squadra interdisciplinare diretta dalla Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (hepia). Il progetto è stato realizzato in collaborazione con gli uffici dell'energia, dell'urbanistica, del patrimonio e degli insediamenti del Cantone di Ginevra e della Città di Carouge. Il documento finale relativo al progetto è consultabile al seguente link: <https://mendrisio.ch/wp-content/uploads/2019/05/03-solarkultur-it-final-web1.pdf>.

<sup>12</sup> [https://www.epfl.ch/labs/leso/research/domains/renewables\\_integration/leso-qsv/](https://www.epfl.ch/labs/leso/research/domains/renewables_integration/leso-qsv/)

Il metodo, oltre a proporsi come strumento utilizzabile dalle amministrazioni per decidere la pianificazione e approvazione dei progetti fotovoltaici su edifici esistenti, può essere di ausilio per classificare i siti più sensibili o quelli dove l'irraggiamento solare è maggiore, con l'obiettivo di pianificare eventuali future installazioni.

Più recentemente, stanno emergendo approcci sistemici che analizzano modelli per l'integrazione di soluzioni fotovoltaiche sul costruito valutando le ricadute in ambito urbano all'interno di progetti *climate resilient* [55]. Ne è un esempio la ricerca sviluppata all'interno del progetto Sinfonia<sup>13</sup> nella quale il framework analitico proposto parte dalla caratterizzazione dell'area urbana di riferimento, sia dal punto di vista morfologico che ambientale. L'obiettivo è, da un lato, di identificare le superfici trasformabili adatte all'applicazione di nuove soluzioni e, dall'altro, di comprendere le prestazioni ambientali dell'area e le sue principali vulnerabilità [56]. Le soluzioni proposte sono raggruppate in cinque categorie: soluzioni verdi, soluzioni blu, agricoltura urbana, *cool materials* e componenti innovativi, sistemi energetici (PV/ST) (Figura 12).

I risultati delle analisi vengono utilizzati per informare gli stakeholder e i cittadini coinvolti nel processo di progettazione e per definire, insieme alle priorità stabilite dai piani comunali, i principali obiettivi da perseguire attraverso la trasformazione delle superfici urbane esistenti. In questa fase, gli obiettivi in termini di resilienza climatica e sostenibilità sono valutati attraverso un processo di analisi multi-criteriale.



Use	Surface	Solution selected
<b>Green solutions</b>	Ground	Road network - Open areas - Increase of vegetation: +15 %
	Building	Façades - Vertical greening systems - Green façade (leaf area density = 1.85 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) on surfaces exposed at south, and façades along the roads with highest T <sub>air</sub>
		Roofs - Horizontal greening system - Extensive green roof
<b>Water solutions</b>	Ground	Road network - Open areas - Water basin (water depth = 2 m) close to <i>Pia Cagliari</i>
	Cool materials	Ground
Building		Open areas - -
		Façades - - Roofs - Cool paint (albedo = 0.80) on the roofs not suitable for energy systems or green solutions
<b>Energy systems</b>	Building	Façades - BIPV on surfaces with suitable solar potential
		Roofs - PV panels
<b>Integrated solutions</b>	Building	Façades - -
		Roofs - Solar green roofs on available flat roof surfaces

Figura 12. Approcci sistemici per l'integrazione di soluzioni fotovoltaiche sul costruito valutando le ricadute in ambito urbano in termini di resilienza climatica [56].

<sup>13</sup> <http://www.sinfonia-smartcities.eu/>

### 2.3.3 Principali database e cataloghi di progetti, prodotti e soluzioni BIPV

Tra le azioni finalizzate alla diffusione di buone pratiche per l'integrazione del fotovoltaico in architettura e implementate dai più noti enti e istituti di ricerca europei, ai fini della presente ricerca è importante citare i portali e i database sui BIPV, dalla cui consultazione è possibile ricavare informazioni salienti sui progetti e prodotti BIPV maggiormente diffusi in Europa.

Una prima azione efficace sotto il profilo della diffusione di buone pratiche è ascrivibile all'IEA-SHC Task 41, che propone una collezione di casi studio internazionali di nuova realizzazione o ristrutturazione, in forma di un database interattivo user friendly, *Solar Energy and Architecture: Collection of Case Studies* [57], con lo scopo di dimostrare le modalità con cui le tecnologie possono integrarsi nel concept dell'edificio, contribuendo ad un'architettura di qualità (Figura 13).

I casi studio selezionati dal Task 41 sono classificati in base a 6 categorie, ciascuna delle quali presenta un certo numero di opzioni selezionabili: *tecnologia solare* (di tipo attivo - fotovoltaico o solare termico - e di tipo passivo), *tipo di intervento* (ex novo/retrofit), *paese*, *tipologie di integrazione nell'involucro* (elementi tecnici aggiunti, elementi tecnici aggiunti con doppia funzione, struttura autoportante, parte della composizione della superficie, superficie completa della facciata/copertura, forma ottimizzata per l'energia solare, altro), *tipo di edificio* (destinazione d'uso) e *anno d'intervento*<sup>14</sup>. Selezionando le opzioni interessate, il database restituisce risultati con esse compatibili, mostrando i soli progetti che soddisfano i criteri selezionati.

Oltre alla piattaforma interattiva, il Task 41 ha pubblicato un catalogo di casi studio e prodotti innovativi BIPV, classificati per elementi costruttivi [58]



Figura 13. Interfaccia della piattaforma “Solar Energy and Architecture: Collection of Case Studies” del Task 41.

<sup>14</sup> Technology, project type, country typologies, building types, year.

L'IEA PVPS Task 15 (Sub task A) ha di recente pubblicato sul suo sito web una selezione di casi studio internazionali completati negli ultimi anni, Successful Building Integration of Photovoltaics. A Collection of International Projects [59], analizzati approfonditamente, mettendone in luce le potenzialità, le sfide e i vincoli (anche di natura economica) incontrati in tutte le fasi del processo decisionale, progettuale e realizzativo, sul tema dell'integrazione architettonica (energetica, tecnico-costruttiva e architettonica); questi, raccontati anche in forma di intervista agli stakeholder coinvolti, rappresentano un catalogo di casi di successo e di *lesson learned*, in grado di orientare i professionisti del settore nell'intero processo di sviluppo di progetti BIPV efficaci e di successo.

Uno degli istituti di ricerca più attivi a livello europeo sul tema dei BIPV è il Centro di Competenza Svizzero sul BIPV della SUPSI<sup>15</sup>, le cui attività di ricerca si focalizzano sull'integrazione di sistemi BIPV negli edifici, come parte integrante ed espressiva del linguaggio architettonico contemporaneo, delle prestazioni e della tecnologia dell'organismo edilizio e sull'integrazione all'interno del processo progettuale di metodologie che favoriscano lo sfruttamento dell'energia solare nell'ambiente costruito, sia per nuove costruzioni sia per il recupero del patrimonio edilizio esistente. Sulla piattaforma BIPV [60], gestita in collaborazione con SvizzeraEnergia<sup>16</sup>, è possibile trovare informazioni essenziali riguardo l'integrazione della tecnologia fotovoltaica negli edifici, oltre ad ampie banche dati relative ai principali prodotti BIPV presenti sul mercato europeo e ad esempi progettuali realizzati sia in Svizzera che all'estero.

L'evoluzione del sito web bipv.ch, già attivo da alcuni anni ma non del tutto aggiornato, è la piattaforma svizzera multidisciplinare e inclusiva sull'energia solare Solarchitecture - Sun as building material [61], gestita e sviluppata grazie alla collaborazione fra cinque partner: SUPSI-ISAAC, SvizzeraEnergia, Swissolar<sup>17</sup>, il Politecnico federale di Zurigo e il Sounding Board<sup>18</sup>. Progetti recenti europei e svizzeri, dettagli costruttivi (rielaborati dagli autori sulla base dei grafici di dettaglio forniti dai progettisti) e prodotti BIPV di ultima generazione sono presentati in maniera approfondita mediante l'uso di riferimenti incrociati, per cui è possibile passare dal caso studio al prodotto BIPV e da quest'ultimo ai corrispondenti dettagli costruttivi. Ampio spazio è dedicato alle caratteristiche tecnologiche ed energetiche degli interventi, unite ad un'accurata descrizione del modulo BIPV in uso, corredata da immagini e grafici. È possibile operare una scrematura dei casi di interesse, selezionando il tipo di applicazione (tetto/ facciata/ altro), intervento (ex novo/risanamento), sistema (fotovoltaico/solar termico/ibrido), ecc. (Figura 14).

<sup>15</sup> Il Centro di Competenza Svizzero sul BIPV viene fondato nel 2005 in seno all'Istituto di Sostenibilità applicata all'Ambiente Costruito (ISAAC) della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), con l'obiettivo di combinare diverse competenze in chiave interdisciplinare, creando sinergie tra architetti, esperti del settore delle costruzioni e specialisti del settore fotovoltaico.

<sup>16</sup> Il programma di promozione della Confederazione nel settore dell'energia SvizzeraEnergia (SwissEnergy) è stato istituito dal Consiglio federale svizzero per promuovere l'efficienza energetica e le energie rinnovabili. Il programma sensibilizza l'opinione pubblica in Svizzera sui problemi energetici, promuove progetti innovativi e sostiene la formazione e lo sviluppo professionale. Il programma contribuisce in modo significativo allo sviluppo e alla visibilità di nuove innovazioni. Swiss Energy fornisce consulenza in materia di energie rinnovabili ed efficienza energetica.

<sup>17</sup> Swissolar, l'associazione professionale svizzera per l'energia solare, rappresenta l'industria solare svizzera, i progettisti, gli installatori, i produttori e gli altri attori dell'industria solare, impegnandosi a favore di un approvvigionamento energetico affidabile, rinnovabile e a basso consumo di risorse per la Svizzera entro il 2050, in cui l'energia solare svolge un ruolo di primo piano. Swissolar riunisce una commissione di esperti in materia di costruzione solare al fine di condividere gli sviluppi attuali e futuri dell'edilizia solare e il suo ulteriore sviluppo [Fonte: <https://solarchitecture.ch/it/a-proposito/>, data consultazione: 05/2021].

<sup>18</sup> Il Sounding Board è un'organizzazione di riferimento il cui scopo è quello di supportare i partner del progetto Solarchitecture nel processo decisionale riguardante la qualità dei contenuti. I membri del Sounding Board hanno approcci e visioni diverse e sono impegnati in diversi settori dell'industria edile (architetti, istituzioni, università e redattori) in tutta la Svizzera [Fonte: <https://solarchitecture.ch/it/a-proposito/>, data consultazione: 05/2021].

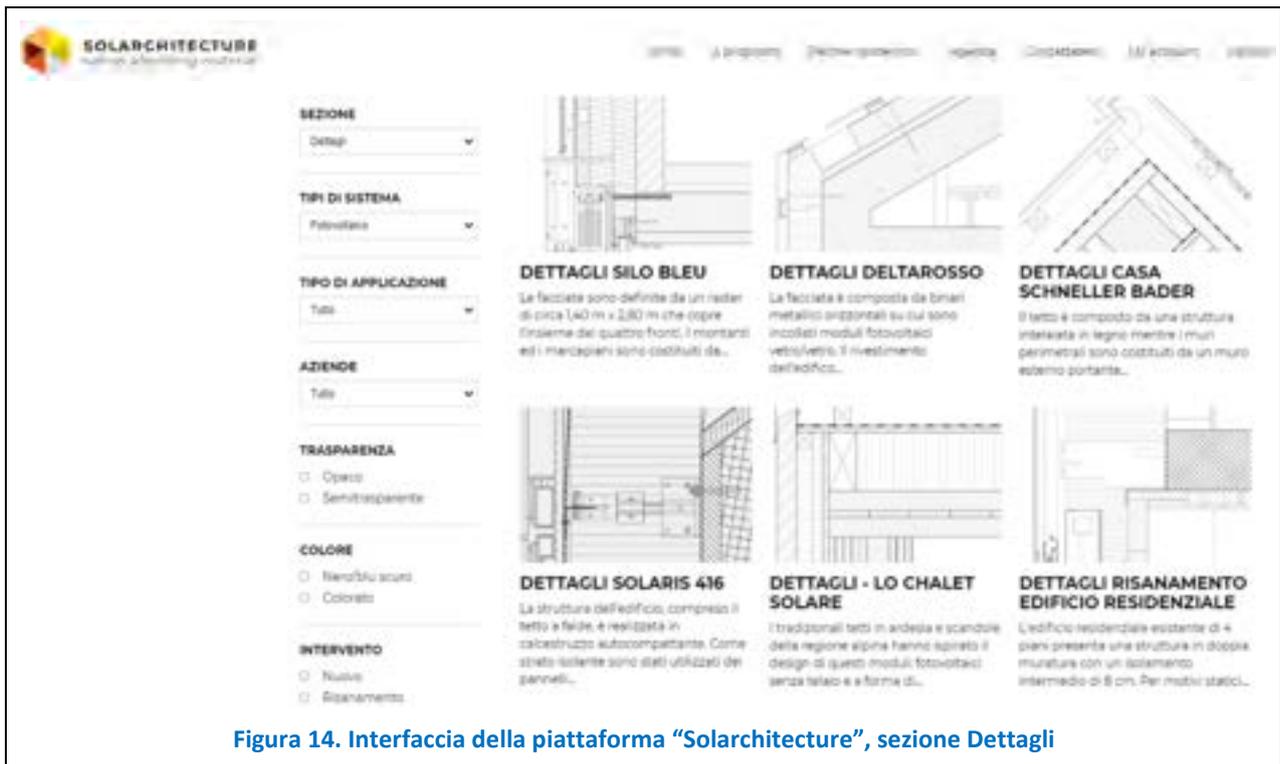


Figura 14. Interfaccia della piattaforma “Solararchitecture”, sezione Dettagli

Il sito web Solar Age [62] è una piattaforma interattiva da cui è possibile accedere a numerosi contenuti multimediali, il cui punto di forza risiede nell’ampia casistica di prodotti solari attivi e progetti, presentati in maniera descrittiva. Purtroppo, uno dei limiti del sito è la consultazione di buona parte dei contenuti esclusivamente in lingua tedesca (Figura 15).



Figura 15. Interfaccia della piattaforma “Solar Age”

In relazione al contesto italiano, l’Istituto per le energie rinnovabili dell’EURAC Research ha elaborato una piattaforma interattiva BIPV - Building Integrated Photovoltaic [63] contenente casi studio (edifici privati e pubblici) illustrati a partire dalla descrizione dei livelli di integrazione tecnologica, estetica ed energetica conseguiti, del processo decisionale e delle lezioni apprese (*lesson learned*), il tutto corredato da descrizioni, informazioni tecniche, immagini e grafici di dettaglio; oltre ai progetti, è possibile accedere ad un catalogo di prodotti BIPV, suddivisi in moduli, sistemi di montaggio, e sistemi per l’integrazione energetica, e descritti a

priorità di caratteristiche energetiche e tecnico-costruttive (tecnologia fotovoltaica, potenza, peso) ed estetico-formali (materiali, forma, dimensioni, trasparenza, colore) (Figura 16).

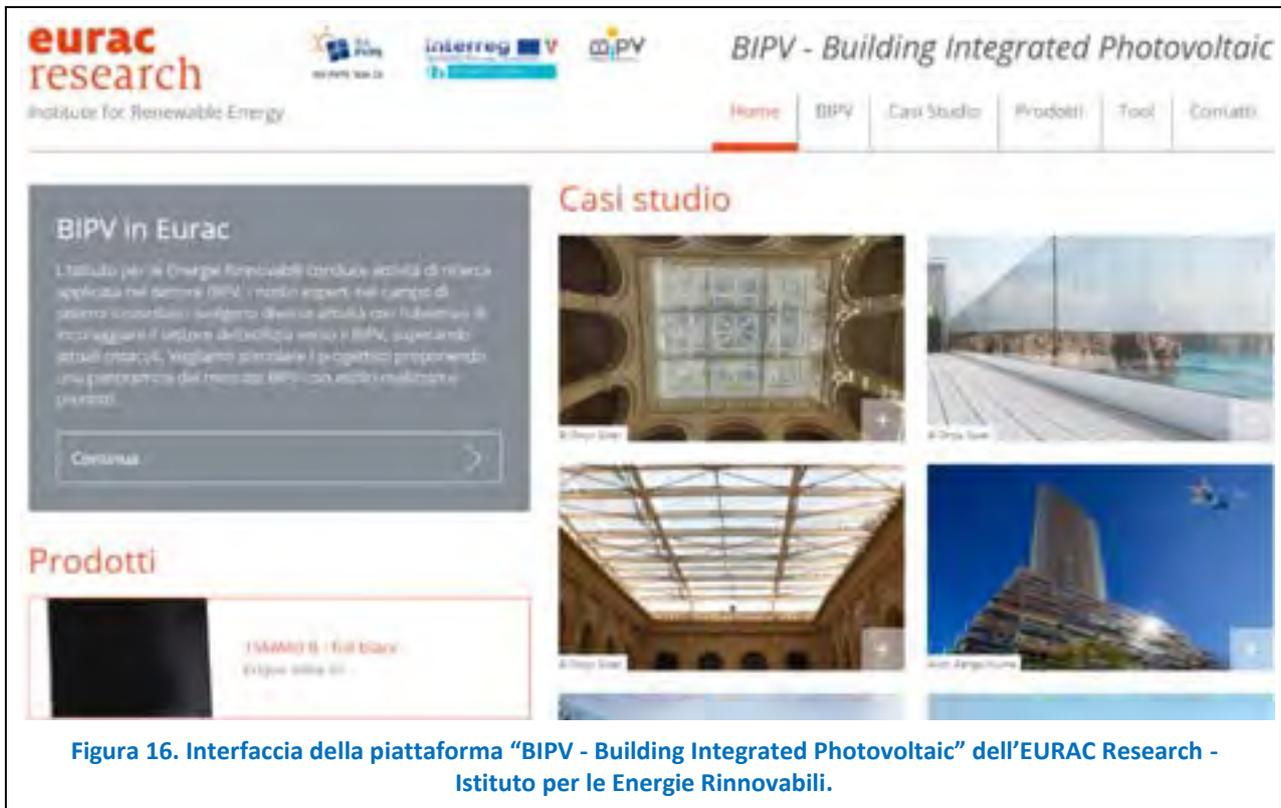


Figura 16. Interfaccia della piattaforma “BIPV - Building Integrated Photovoltaic” dell’EURAC Research - Istituto per le Energie Rinnovabili.

A seguire si riporta uno schema riepilogativo dei database e cataloghi consultati per la presente ricerca, indicando in quali lingue sono presentati e mettendo in evidenza i rispettivi campi di indagine (progetti, prodotti e dettagli costruttivi) con il numero di progetti, prodotti e dettagli BIPV da essi catalogati<sup>19</sup> (Tabella 2).

Tabella 2. Principali piattaforme e database consultati per la presente ricerca, con identificazione del rispettivo campo d’indagine.

Database e cataloghi consultati		Lingue	Progetti	Prodotti	Dettagli
1	 IEA SHC Task 41	ENG	<input checked="" type="checkbox"/> 50 + 20	<input checked="" type="checkbox"/> 20	
2	 IEA PVPS Task 15	ENG	<input checked="" type="checkbox"/> 25		
3	 SUPSI	IT / ENG	<input checked="" type="checkbox"/> 126	<input checked="" type="checkbox"/> 136	
4	 SOLARCHITECTURE	IT / ENG	<input checked="" type="checkbox"/> 20	<input checked="" type="checkbox"/> 10	<input checked="" type="checkbox"/> 7
5	 SOLAR AGE	DE / ENG	<input checked="" type="checkbox"/> 205	<input checked="" type="checkbox"/> 555	
6	 EURAC Research	IT / ENG	<input checked="" type="checkbox"/> 60	<input checked="" type="checkbox"/> 30	

<sup>19</sup> Alcuni dei database analizzati sono oggetto di continui aggiornamenti in progress, pertanto si fa qui riferimento ad una consultazione avvenuta in data 30/05/2021.

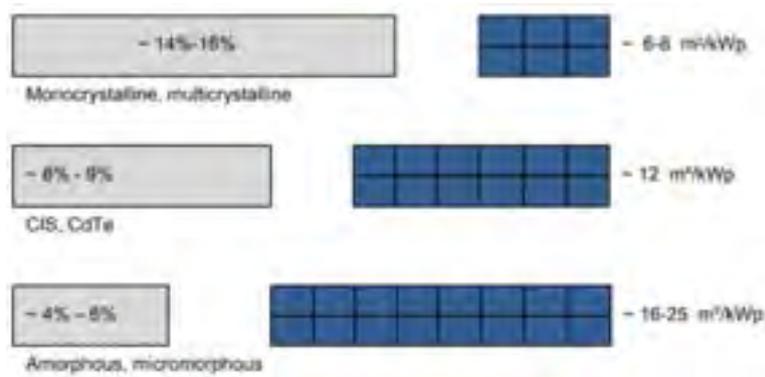
## 2.4 Aspetti ambientali e tipo-morfologici che incidono sulla produzione energetica

Al fine di valutare il potenziale di producibilità energetica di un sistema BIPV, come definito nella letteratura tecnica, è necessario identificare le caratteristiche ambientali e urbane del sito in cui si inserisce l'intervento. Ciò si traduce nell'individuazione di un insieme di parametri riferiti al contesto e all'edificio al fine di orientare il processo decisionale verso le soluzioni FV più efficaci e appropriate.

Nella progettazione di sistemi BIPV bisogna tener conto in primis della posizione geografica al fine di determinare la radiazione solare sulle superfici che presentano orientamenti e inclinazioni diverse, nonché l'incidenza delle ombre portate dipendenti da specifici elementi del contesto (vegetazione, orografia del terreno, ecc.), dal tipo di tessuto urbano (caratterizzato da determinati livelli di densità edilizia, ampiezza delle strade e altezza degli edifici), e dalle caratteristiche morfologiche dell'edificio stesso.

Per gli edifici situati nei contesti urbani l'analisi dell'ombreggiamento è determinante al fine di identificare le superfici più idonee per l'integrazione di sistemi FV; le ombre, anche se parziali sulla superficie dei moduli BIPV, provocano una riduzione notevole del rendimento, rendendo improduttivo l'impiego di sistemi FV. In questi casi, l'uso di moduli *dummies* - ossia elementi fittizi aventi le stesse caratteristiche tecnologiche e morfologiche del modulo BIPV - permette di ottenere un aspetto omogeneo in facciata, in quanto le parti "attive" non risultano immediatamente riconoscibili rispetto a quelle "inattive".

Determinate le superfici adeguate all'integrazione di sistemi BIPV è necessario definire la tecnologia FV da impiegare rispetto ad azimut e tilt delle superfici e alla soluzione tecnica definita. Rispetto alle diverse tecnologie FV presenti attualmente sul mercato, a parità di superficie destinata ai sistemi BIPV, si possono ottenere esiti energetici notevolmente differenti (Figura 17).



**Figura 17. Variazione dello spazio richiesto per l'installazione di pannelli fotovoltaici in relazione all'efficienza di conversione dei moduli [Fonte grafici: SUPSI, ISACC].**

Di seguito viene riportata una breve trattazione relativa agli aspetti ambientali e tipo-morfologici che incidono maggiormente sulla produzione energetica di un sistema BIPV.

### Radiazione solare

La radiazione solare o irraggiamento incidente può essere definita come l'energia solare che colpisce una data superficie per unità di tempo ( $W/m^2$ ). È un parametro indispensabile per la stima della produzione energetica di un sistema solare.

L'intensità della radiazione solare captata da un sistema FV si ottiene sommando le componenti di radiazione solare diretta, diffusa e riflessa (o albedo) e varia in relazione a diversi fattori, tra i quali:

- l'angolo d'inclinazione della radiazione, al crescere dell'angolo di inclinazione cresce l'intensità;
- l'influenza delle nubi, difficilmente quantificabile perché il fenomeno nuvoloso è irregolare nel tempo e molto variabile in intensità. Con condizioni d'intensa copertura nuvolosa, i raggi diretti del Sole sono completamente schermati dalle nubi e il contributo alla misura dell'irradianza al suolo

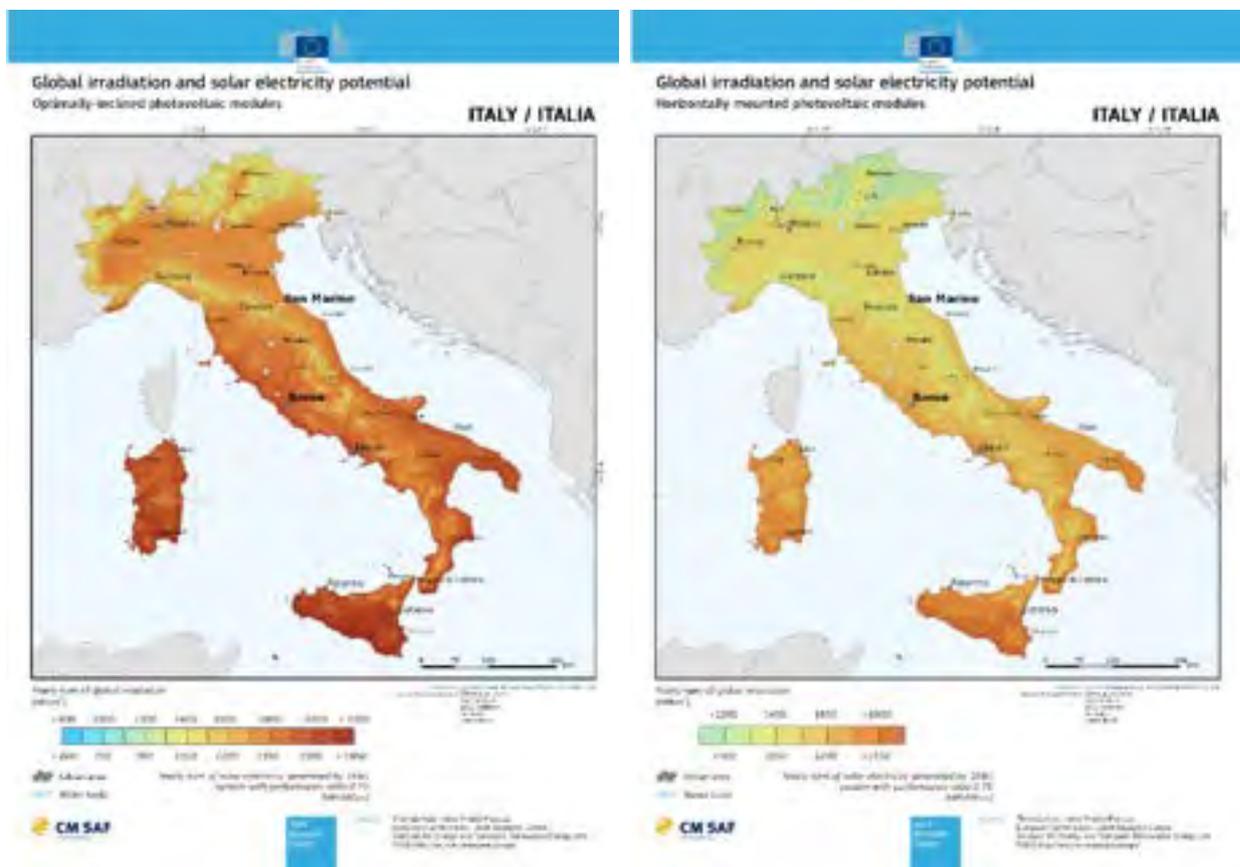
proviene esclusivamente dalla radiazione diffusa. Come risultato, l'irradianza stessa scende fino a valori dell'ordine di  $50 \div 100 \text{ W/m}^2$  e anche meno;

- lo spessore dell'atmosfera attraversata dai raggi, maggiore è lo spessore attraversato, minore sarà la radiazione che raggiunge la superficie.

Per ogni località geografica ci sono diversi livelli di irradiazione, in relazione anche all'orientamento e all'inclinazione dei moduli PV. Tali dati sono facilmente desumibili da appositi tool, database, misurazioni o da mappe solari [64]. Al fine di valutare l'effettiva produzione elettrica di un qualsiasi impianto fotovoltaico occorre, quindi, conoscere i valori di radiazione solare del sito e delle diverse superfici dell'edificio interessato per ottimizzare la progettazione degli elementi captanti degli impianti fotovoltaici.

In generale, i sistemi BIPV andrebbero posizionati sulle superfici su cui la radiazione solare risulta essere massima, così da ottenere una produzione energetica maggiore a fronte di un'area di installazione minore.

Come si può desumere dalla mappa della variazione della radiazione globale sul territorio nazionale (Figura 18), un impianto fotovoltaico, a parità di inclinazione e potenza in kWp installata, sarà in grado di generare quantità di energia elettrica che variano sostanzialmente fra il nord e il sud Italia.



**Figura 18. A sinistra, mappa dell'Italia che mostra la variazione della radiazione globale e potenziale elettricità prodotta da un impianto potenziale con inclinazione orizzontale. A destra, mappa dell'Italia che mostra la variazione della radiazione globale e potenziale elettricità prodotta da un impianto potenziale con inclinazione ottimale [Fonte grafici: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_index.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html)].**

#### Angolo di azimut e tilt

Si definisce "azimut" l'angolo tra la normale ai moduli fotovoltaici e il sud geografico. L'orientamento a sud, considerato nel nostro emisfero geografico ottimale per la produzione di energia del sistema fotovoltaico, corrisponde a un azimut di  $0^\circ$ . Se il modulo è orientato a est, l'azimut assume un valore di  $-90^\circ$  (valore

crescente negativo da sud a nord in senso antiorario), se è orientato a ovest, l'azimut assume un valore di +90° (valore crescente positivo da sud a nord in senso orario).

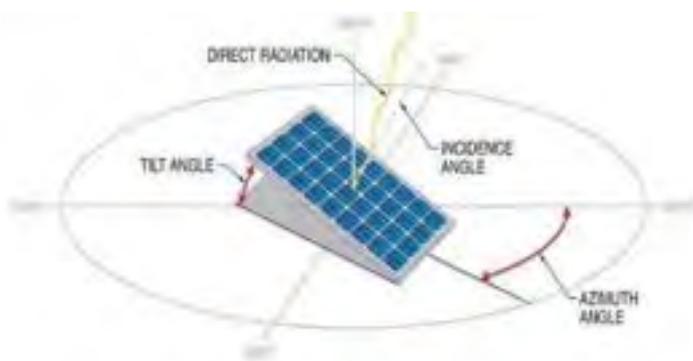
Per massimizzare la produzione annua i sistemi fotovoltaici vanno orientati generalmente a sud nell'emisfero boreale e a nord nell'emisfero australe, molto varia in relazione al tilt o inclinazione dei moduli PV installati. Analogamente, per superfici inclinate a 90°, l'orientamento ottimale risulta essere quello a sud nel nostro emisfero [64]. Per i sistemi BIPV è particolarmente importante, quindi, considerare nella progettazione l'orientamento ottimale delle superfici attive.

Si definisce "tilt" l'angolo di inclinazione formato tra il piano orizzontale e il piano di giacitura dei moduli fotovoltaici; questo corrisponde a 0° se i moduli sono installati sul piano orizzontale (copertura piana) e a 90° sul piano verticale (facciata). Più i raggi solari incidono perpendicolarmente sui pannelli fotovoltaici, maggiore è la loro efficienza nel convertire l'energia solare. L'inclinazione ottimale dei moduli dipende dalla latitudine, e dunque dalla posizione geografica dell'edificio e si attesta fra i 10° e i 60°. Per le latitudini del territorio italiano l'inclinazione ottimale è di circa 30° (Figura 19a).

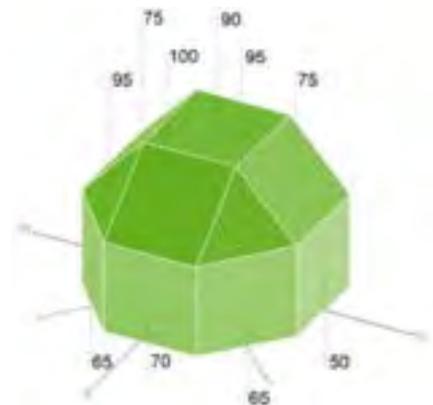
Nel caso di sistemi BIPV e dunque sistemi nei quali l'elemento fotovoltaico assume anche il ruolo di elemento da costruzione come componente dell'involucro, dispositivo di protezione solare o, in generale, elemento architettonico, l'inclinazione sarà strettamente legata alla morfologia dell'edificio.

Generalmente, un tetto inclinato rivolto a sud presenta un potenziale di produzione energetica maggiore rispetto a una superficie orizzontale, mentre spostandosi verso est e ovest, tale potenziale tende a ridursi significativamente. Il parametro dell'orientamento non determina una variazione sul potenziale energetico di una copertura orizzontale.

Dalla Figura 19b è possibile desumere come la massima produzione di energia si ottiene su una superficie con inclinazione ottimale con esposizione a sud, mentre diminuisce gradualmente (fino al 25%) qualora i sistemi fotovoltaici siano orientati a est o a ovest. È possibile ottenere un profilo di generazione di elettricità più uniforme nel corso della giornata orientando i sottosistemi che compongono il sistema BIPV in direzioni diverse; tale soluzione può aiutare a ridurre al minimo il carico sulla rete elettrica.



**Figura 19a. Rappresentazione schematica dei parametri di azimut e tilt, attraverso i quali è possibile ottimizzare la produzione energetica.**



**Figura 19b. Variazione della produzione energetica in relazione alla variazione di azimut e tilt [Fonte grafici: SUPSI, ISAAC].**

### Tipo di tessuto

Lo studio del tessuto urbano risulta particolarmente influente ai fini della stima della produzione energetica dei sistemi fotovoltaici, soprattutto per l'individuazione delle aree dell'edificio caratterizzate da idoneità architettonica e solare, ossia aree che possiedono un'adeguata quantità di radiazione solare in relazione all'orientamento, inclinazione e presenza di ombre [65], e quindi in grado di ospitare sistemi fotovoltaici. Le ombre possono essere autoportate, quando sono dovute a caratteristiche morfologiche dell'edificio, e, portate quando, invece, sono prodotte da edifici, vegetazione o altri elementi del contesto.

Il parametro relativo al tessuto urbano che maggiormente incide sul funzionamento di un sistema fotovoltaico risulta essere la densità [66], infatti, le superfici dei fabbricati, in contesti caratterizzati da

superfici edificate elevata e spazi tra gli edifici minimi hanno un accesso limitato alla fonte solare e risultano essere per la maggior parte dell'anno in ombra, in particolare se consideriamo superfici verticali o inclinate a 90° (Figura 20).

Anche la distanza degli ostacoli e l'orientamento di questi rispetto a un edificio di riferimento sono fattori che influenzano la produzione energetica. La condizione auspicabile si ha quando gli ostacoli sono posizionati a nord, o a nord-est/nord-ovest, o a sud, rispetto ad un edificio di riferimento con sistemi BIPV in copertura, poiché, a prescindere dalla distanza e altezza degli ostacoli, la produzione energetica risulta essere elevata [67]. L'irradiazione solare incidente, in questi casi, risulta poco suscettibile alla presenza degli ostacoli.

La definizione e caratterizzazione di un tipo di tessuto urbano può essere definita da diversi fattori che è possibile sintetizzare in tre parametri chiave:

- Distanza media tra gli edifici o ampiezza delle strade -  $W_m$ ;
- Altezza media degli edifici -  $H_m$ ;
- *Building Coverage Ratio* - BCR: rapporto tra la superficie edificata e quella libera di una determinata area.

Da tali parametri è possibile ricavare l'indice di 'morfologia urbana  $U = BCR \cdot H_m / W_m$ ' [68] che descrive sinteticamente le caratteristiche di un contesto.

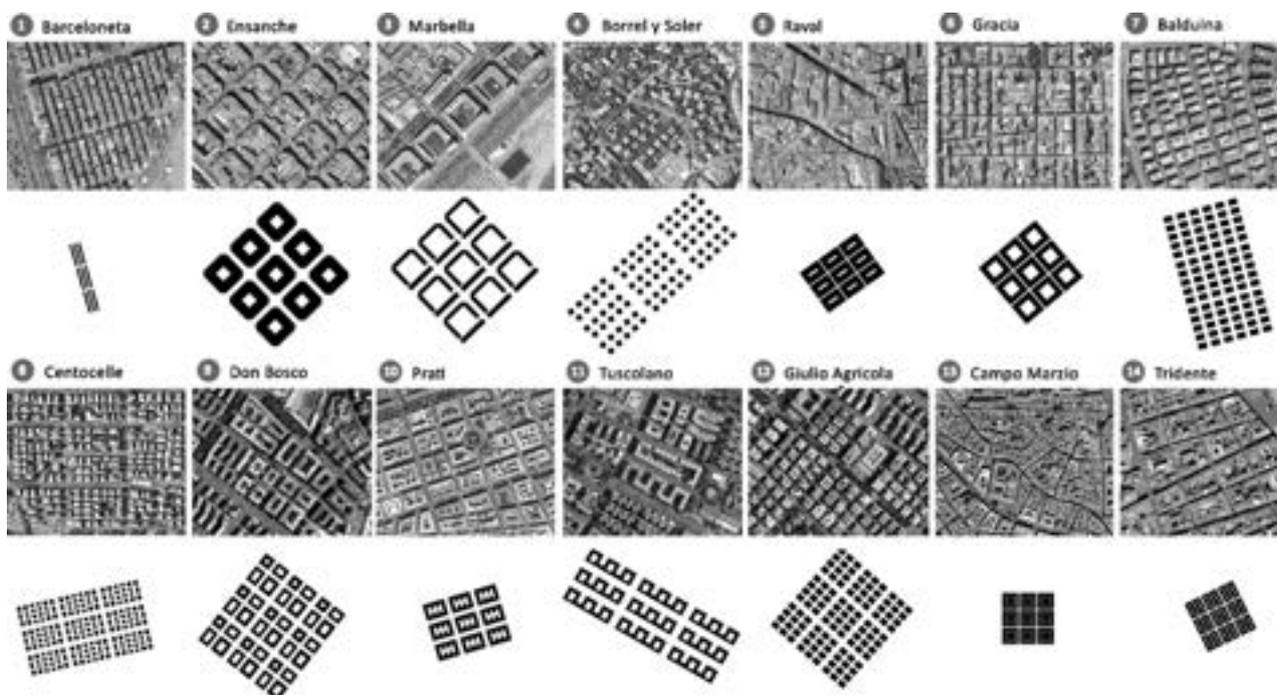


Figura 20. Analisi della morfologia urbana [69].

### Morfologia dell'edificio

L'analisi morfologica alla scala di edificio è finalizzata alla comprensione del potenziale di integrabilità dei sistemi BIPV in rapporto al soleggiamento delle superfici appartenenti all'involucro edilizio. Per un utilizzo ottimale del fotovoltaico uno dei fattori da considerare è l'eventuale presenza di ombre che influiscono notevolmente sul rendimento finale. Altro fattore determinante che deriva dalla composizione degli elementi in facciata è la quantità di superficie idonea a ospitare i sistemi fotovoltaici (Figura 21).

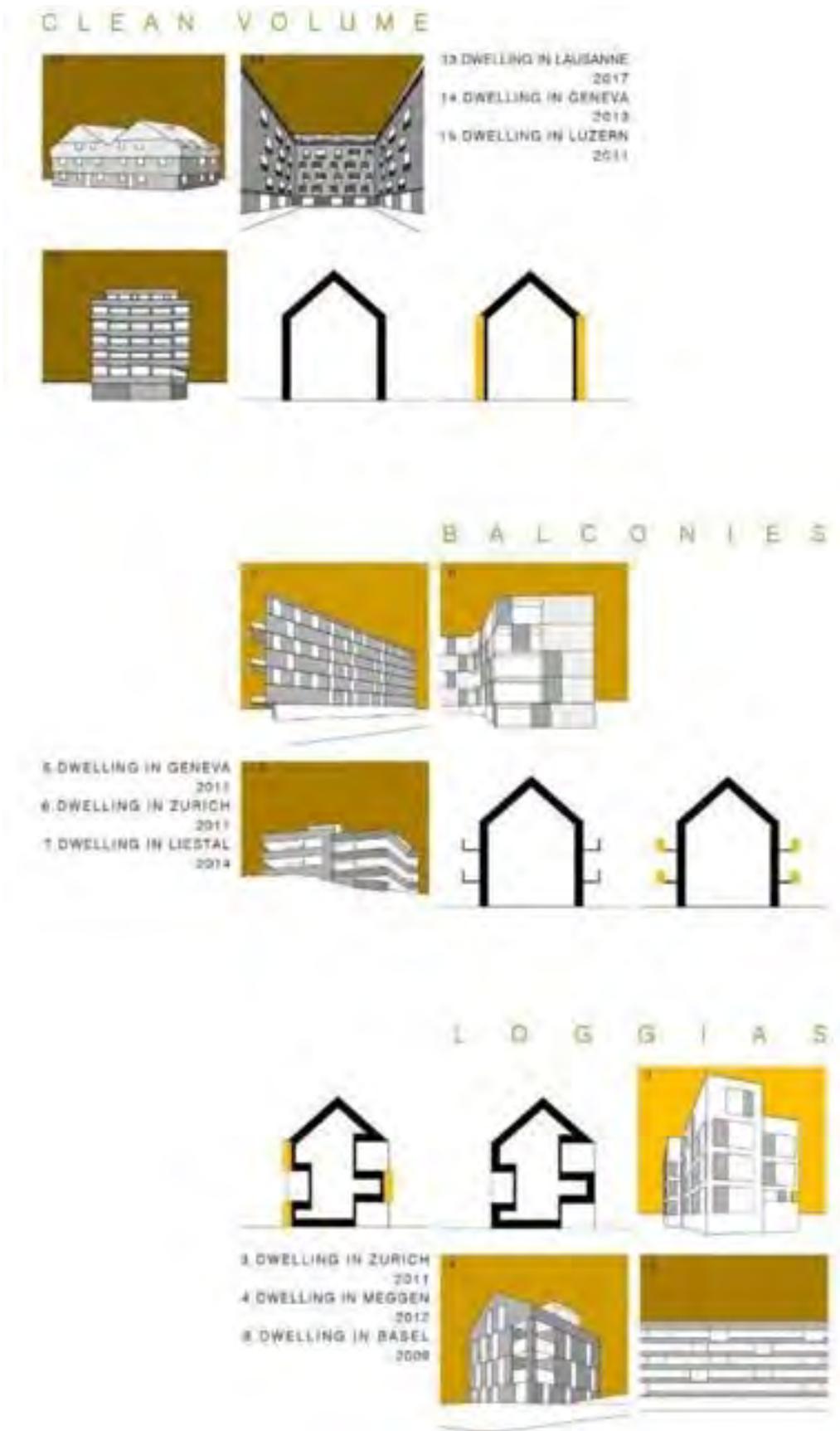


Figura 21. Schemi di morfologia di facciata e corrispondente integrazione BIPV [70].

In generale, la massima radiazione solare è più facile da raggiungere sulle coperture con sistemi BIPV piuttosto che sulle facciate (le superfici tra 60° e 0° sono considerate tetti e le superfici tra 90° e 60° sono considerate facciate. Per questo motivo, le facciate BIPV hanno una resa energetica potenziale per metro quadrato inferiore dal 20% al 40% rispetto alle coperture BIPV. Tuttavia, le facciate possono includere dispositivi esterni come i sistemi di controllo solare, che possono essere inclinati e orientati per massimizzare la produzione elettrica BIPV [70].

Diversi studi [70; 55; 71] si sono focalizzati sull'analisi della morfologia delle facciate per definire categorie ricorrenti:

- forma compatta, senza sporti né aggetti, priva di spazi esterni; in questo caso l'integrazione di sistemi fotovoltaici può avvenire in ogni superficie perché la mancanza di elementi aggettanti non determinerà la presenza di ombre autoportate su nessuna delle superfici;
- presenza di elementi aggettanti quali balconi, ballatoi e sporgenze; i sistemi BIPV in questo caso andranno posizionati nelle superfici più esterne dell'edificio per evitare la presenza di ombre proprie;
- presenza di logge e rientranze; anche in questo caso le superfici idonee all'installazione di sistemi fotovoltaici saranno quelle più esterne.

Molti degli edifici esistenti presentano morfologie di facciata miste rendendo necessaria un'analisi delle possibilità di integrazione dei sistemi fotovoltaici rispetto agli specifici elementi architettonici presenti.

Per quanto riguarda le coperture comunemente utilizzate, in edilizia possono distinguersi in:

- orizzontali: con pendenza compresa tra 0% e 5%;
- inclinati: con pendenza superiore al 5%;
- curve: quando la superficie dell'estradosso presenta un andamento curvo regolare o irregolare.

Nella progettazione di sistemi BIPV in copertura, bisognerà fare particolare attenzione alla presenza di ostacoli, quali canne fumarie, antenne, lucernari e parapetti, che potrebbero comportare la formazione di ombre sulla superficie FV e quindi compromettere la potenziale produzione energetica del sistema impiantistico.

## 2.5 Strumenti e software per la simulazione della produzione energetica dei sistemi BIPV

La rapidità con cui i sistemi BIPV si stanno diffondendo in architettura ha comportato un aumento della domanda nel settore edilizio di strumenti e software specifici per la simulazione dei potenziali esiti energetici derivanti dall'integrazione di soluzioni FV [72]. In relazione ai differenti attori del processo edilizio, emergono specifiche esigenze legate ai tool per la progettazione di sistemi BIPV. Per i produttori, ad esempio, l'obiettivo basilare è quello di massimizzare i benefici dell'intero ciclo di vita del sistema fotovoltaico, mentre per i committenti è di rilevante importanza conoscere i tempi di recupero dell'investimento in relazione a diversi scenari di progettazione, con confronti costi-benefici analizzati anche rispetto a possibili politiche di incentivazione. Per i progettisti, al fine di massimizzare in termini energetici gli apporti dei sistemi BIPV, sono cruciali le informazioni relative alle caratteristiche del contesto ambientale, dell'edificio, al relativo consumo di energia primaria e a tool per il confronto di diverse alternative tecniche e progettuali. Diversi studi [73; 74; 75] analizzano le caratteristiche dei principali tool esistenti per la progettazione di sistemi BIPV.

Da questi studi è possibile individuare tre categorie prevalenti:

- standalone tool;
- CADD/BIM plugin;
- online tool.

Per quanto riguarda gli standalone tool fra i più diffusi troviamo: System Advisor Model (SAM) 2017.1.17; RETScreen; Expert Homer Pro; PV \*SOL Expert; PV Scout; Solar F-Chart; Sunulator Pvsyst; Helios; 3D solarparkplanung; Polysun; INSEL; Aurora; ArcGIS; SolarPro; PVSITES, BIMsolar; SolarBIM PV; Helioscope; PV-DesignPro; PVComplete; Solar Pro; Solergo; BLUESOL.

In riferimento ai CADD/BIM plugin<sup>20</sup> è possibile citare: INSIGHT *Solar Analysis tool* per Autodesk Revit, Ladybug per Rhinoceros/Grasshopper, Skellion per Google Sketchup.

Infine, fra i tool online troviamo: PVGIS, EasyPV, PV\*SOL Online e PVwatts.

Di seguito vengono dettagliate i punti di forza e le criticità di alcuni dei tool sopra citati.

### PVSITES<sup>21</sup>

Software standalone esito della ricerca Horizon 2020 'PVSITES: Building-integrated photovoltaic technologies and systems for large-scale market deployment', attualmente disponibile nella versione gratuita (beta) (Figura 22). Tool sviluppato seguendo un processo logico di progettazione che si pone in continuità con la metodologia BIM (*Building Information Modeling*): la fase di modellazione dell'edificio e del contesto viene delegata agli strumenti BIM, importando il modello con diverse estensioni (IFC - *Industry Foundation Classes*, gbXML - *Green Building XML*, etc.). Il tool consente, inseriti i dati climatici del sito, di valutare in modo interattivo l'irradianza delle superfici e la presenza di ombre portate sull'edificio oggetto di studio, permettendo di scegliere le arie più idonee all'installazione di sistemi BIPV. L'interfaccia del software è *user-friendly* con diversi *widget* finalizzati alla descrizione e comprensione dei dati richiesti. La presenza di un database di moduli e celle fotovoltaiche interno, integrabile dall'utente con ulteriori prodotti disponibili in commercio, e la possibilità di progettare in ambiente tridimensionale sono i punti di forza del tool, insieme all'interoperabilità con tutti i software BIM, mentre l'impossibilità di sviluppare contemporaneamente diverse soluzioni progettuali per comparare le produzioni energetiche stimate rappresenta un punto critico del software. Gli output includono dati e grafici, esportabili in .csv o come immagini, relativi a:

- produzione energetica, rendimento ed efficienza dei moduli;
- quantità di radiazione solare sulle superfici dell'involucro;
- perdite derivanti dalla temperatura e dalle ombre portate;
- costi dell'installazione e possibile risparmio in bolletta.

<sup>20</sup> Secondo recenti studi dell'IEA TASK 56, la progressiva penetrazione della pratica BIM nel settore delle costruzioni potrà costituire un veicolo per l'adozione da parte del mercato delle soluzioni di involucro solare integrato negli edifici. Inoltre, sebbene questi processi possano sembrare creare oneri aggiuntivi per le aziende coinvolte nel processo di costruzione, il vantaggio è che possono essere generate nuove opportunità basate su modelli di business innovativi e partnership tra aziende [28].

<sup>21</sup> Link: <https://www.pvsites.eu/>



Figura 22. Interfaccia grafica di PVsities. Sulla sinistra i *common button*, a destra comandi di navigazione in ambiente 3D, in alto *ribbon* per l'inserimento di dati, in basso a sinistra i *widget*.

**RETScreen<sup>22</sup>**

RETScreen è un software standalone specifico per l’analisi di fattibilità ambientale ed economica di progetti che prevedono l'utilizzo delle energie rinnovabili e di cogenerazione, nonché delle prestazioni energetiche di un edificio (Figura 23). RETScreen permette ai progettisti di misurare e verificare con facilità le prestazioni di impianti fotovoltaici o solari termici per il riscaldamento e raffrescamento, permettendo confronti tra diverse alternative progettuali. Consente inoltre di ottenere una stima della quantità di emissioni di gas climalteranti per ogni impianto. Essendo un’applicazione basata su un modello Microsoft Excel non è possibile ottenere una visualizzazione tridimensionale dell’edificio oggetto di studio; tutti i dati, come quelli climatici, di localizzazione, caratteristiche tecniche degli impianti, investimento iniziale e costi di esercizio e manutenzione andranno inseriti manualmente in apposite celle. Anche i risultati delle simulazioni verranno riportate sottoforma di tabelle e grafici e consentiranno di ottenere informazioni relative a produzione di energia, analisi del ciclo di vita, riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e analisi del rischio dell’investimento. Il tool contiene al suo interno dati tecnici e di costo delle tecnologie presenti sul mercato, come pompe di calore, riscaldamento a biomassa, eolico, oltre ai database climatici necessari per le analisi.

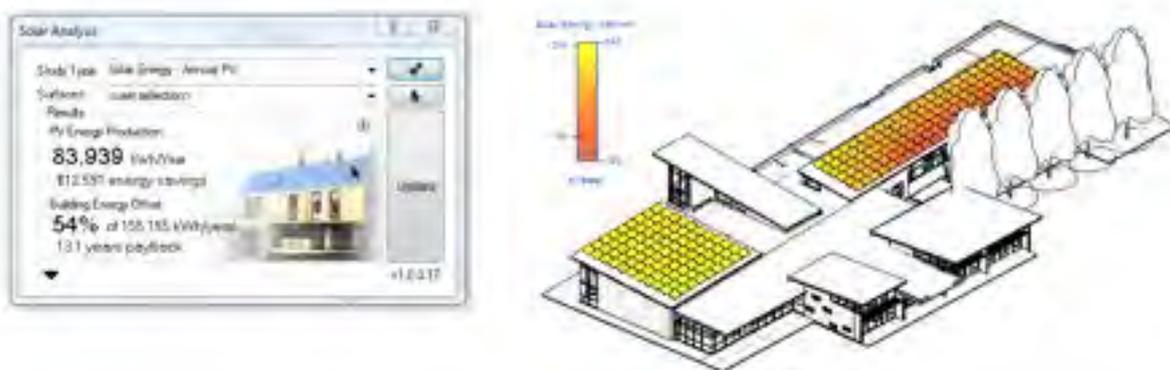


Figura 23. Metodologia operativa che rappresenta i cinque step da sviluppare per ottenere una valutazione di fattibilità ambientale ed economica di un progetto utilizzando il tool RETScreen. Fonte grafici: <https://www.reep.org/projects/standardised-financial-legal-documentation-retscreen>.

<sup>22</sup> Link: <http://www.etscreen.net>

### INSIGHT - Solar Analysis<sup>23</sup>

Il tool *Solar Analysis* contenuto nel plugin INSIGHT per Autodesk Revit consente di analizzare la radiazione solare e stimare la produzione energetica di un sistema fotovoltaico su una superficie del modello BIM dell'edificio in relazione alla localizzazione, all'orientamento e alla forma. Il tool permette di visualizzare in modo interattivo la presenza di ombre portate causate da elementi del contesto, facilitando l'individuazione delle aree adatte all'installazione di pannelli FV. È possibile inoltre ottenere indicazioni rispetto al ritorno economico dell'investimento e ai potenziali risparmi in bolletta (Figura 24). Ulteriori punti di forza sono la progettazione tridimensionale, che rende semplice il controllo e la gestione del progetto da parte dell'utente e la facilità con cui è possibile testare diverse soluzioni progettuali e ottenere diverse informazioni dallo stesso modello. Nonostante ciò, il tool permette di scegliere tra una quantità limitata di tecnologie fotovoltaiche senza possibilità di personalizzazione o integrazioni da fonti esterne. Il tool inoltre non fornisce informazioni sulle perdite derivanti dalla presenza delle ombre o dovute al surriscaldamento dei moduli.



**Figura 24. Finestra di dialogo del tool INSIGHT 360 - Solar Analysis durante la progettazione di un sistema fotovoltaico in copertura. Fonte grafici: <https://blogs.autodesk.com/insight/pv-building-energy-offsets-with-insight-360-solar-analysis-2/>.**

### Ladybug plugin<sup>24</sup>

Il plugin Ladybug sviluppato per il software di modellazione algoritmica Grasshopper è un tool che consente di importare e analizzare dati climatici, schematizzare e personalizzare i diagrammi relativi a percorso del Sole, ventilazione, radiazione solare ed eventuale presenza di ombre portate (Figura 25). Affiancando alla modellazione tridimensionale in Rhinoceros l'uso del plugin Ladybug in ambiente parametrico, è possibile effettuare analisi sulla stima della produzione energetica e la perdita derivante dalla presenza delle ombre. Il plugin contiene al suo interno un database di moduli fotovoltaici e inverter che possono essere inseriti per le simulazioni, ma non consente l'implementazione da parte dell'utente di ulteriori prodotti. Fra i punti di forza, la possibilità di effettuare analisi relative al costo degli impianti fotovoltaici, alla valutazione dell'effetto isola di calore e l'impatto in termini termo-igrometrici sull'ambiente interno. Tuttavia, il plugin non consente di ottenere informazioni relative alla riduzione delle emissioni di gas climalteranti in seguito all'inserimento di sistemi BIPV e ha tempi di simulazione piuttosto lunghi non facilitando la valutazione di alternative soluzioni progettuali.

<sup>23</sup> Link: <https://www.autodesk.com/products/insight/overview>

<sup>24</sup> Link: <https://www.food4rhino.com/app/ladybug-tools>

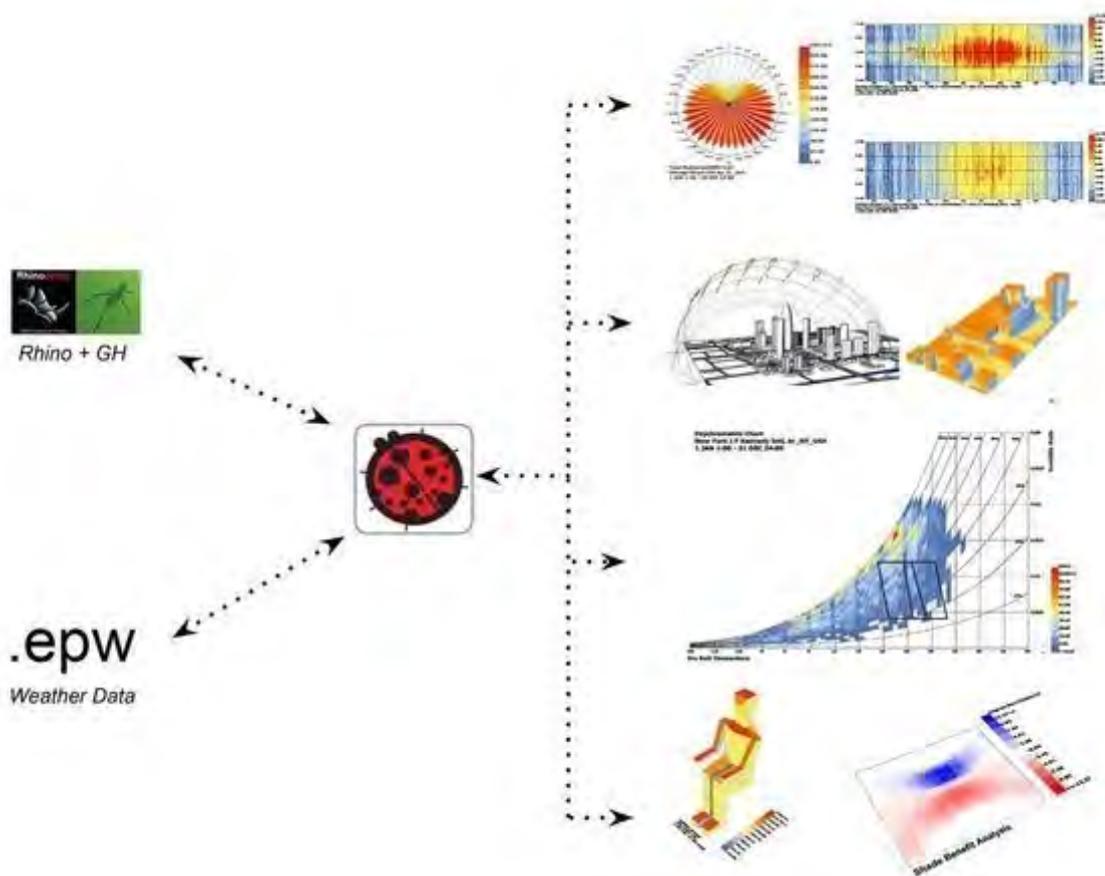


Figura 25. Dati di input e output del plugin Ladybug per Rhinoceros/Grasshoper. Fonte grafici: <https://www.grasshopper3d.com/>.

*PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System<sup>25</sup>*

Il tool online e gratuito PVGIS sviluppato dal JRC – Joint Research Centre (Institute for Energy and Transport) consente di ottenere una stima potenziale della produzione di energia fotovoltaica per sistemi in rete, inseguitori o autonomi, considerando alcuni dati di input del sistema fotovoltaico quali:

- localizzazione, che permette di ottenere informazioni relative alla radiazione solare;
- tecnologia fotovoltaica, è disponibile la selezione fra silicio cristallino, CIS o Cdte;
- potenza di picco;
- azimut e inclinazione;
- posizione di montaggio: a terra (per moduli installati su telaio che presentano una ventilazione posteriore) o integrata nell'edificio (per moduli senza ventilazione).

All'interno della piattaforma (Figura 26) sono stati inseriti dei widget che descrivono in modo sintetico tutti gli input richiesti, supportando l'utente nell'inserimento dei dati. L'integrabilità dei sistemi fotovoltaici è valutata solo in relazione alla presenza o meno di ventilazione, in quanto determinante sulle perdite derivanti dalla temperatura dei moduli. Gli output, esportabili in PDF, offrono informazioni dettagliate sia numeriche che grafiche sull'irraggiamento annuale [kWh/m<sup>2</sup>], produzione annuale [kWh] e perdite percentuali derivanti da fattori come l'angolo di incidenza.

<sup>25</sup> Link: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>



**Figura 26. Piattaforma PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System. Fonte grafici:**  
<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>.

Dall'analisi degli strumenti e i software maggiormente diffusi in ambito progettuale emerge la necessità di un ulteriore sviluppo di metodi e strumenti di supporto per il calcolo impiantistico e la corretta progettazione dei BIPV, che siano accurati, intuitivi e di facile impiego per la simulazione congiunta delle prestazioni tecnologiche ed energetiche degli edifici. Data la progressiva adozione della metodologia BIM nel settore edilizio, si ritiene che i tool o plugin per la simulazione degli esiti energetici di integrazioni BIPV tenderanno ad essere integrati all'interno dei processi BIM, basati su ambienti digitali collaborativi, migliorando così lo scambio di informazioni fra i diversi attori e consentendo ai team di collaborare in modo più efficace, con accesso ad analisi iterative immediate e identificando le criticità lungo tutte le fasi del processo.

### 3 Offerta industriale e integrazione architettonica di sistemi BIPV. Cataloghi di prodotti e casi studio

#### 3.1 Sistemi integrati e componentistica industriale FV per l'edilizia: i trend dell'offerta produttiva

Molteplici fattori, quali le politiche tecniche e ambientali, i programmi nazionali e un quadro normativo sempre più esigente in materia di rendimento energetico degli edifici, contribuiscono sinergicamente a ridisegnare i trend dell'offerta produttiva del fotovoltaico, in particolare nell'ambito del settore edilizio.

Nei prossimi dieci anni nel nostro Paese dovremo aggiungere 30GW di nuova capacità installata per poter raggiungere l'obiettivo prefissato dalla comunità internazionale; per riuscirci, le tecnologie emergenti - l'intelligenza artificiale, il cloud, l'analisi dei big data e il 5G - avranno certamente impatti significanti anche nel settore energetico. Si prevede che entro il 2025 oltre il 90% degli impianti fotovoltaici sarà digitalizzato e oltre il 70% utilizzerà algoritmi di diagnosi IA per ottimizzare automaticamente la redditività dell'impianto e il rilevamento di malfunzionamenti. Gli impianti fotovoltaici con stoccaggio di energia supereranno il 30%, attuando il *peak shaving* (immagazzinamento dell'energia quando la domanda è bassa per rilasciarla quando la domanda elettrica è alta) e oltre l'80% dei sistemi residenziali si conetterà con le reti *Virtual Power Plant* (VPP) con un importante ruolo fornito dalle tecnologie ICT (5G, blockchain, cloud). Per ridurre i costi di manutenzione, il design modulare diventerà mainstream, poiché consente un'implementazione flessibile, un'espansione regolare e una manutenzione senza l'intervento di tecnici, nel rispetto dei requisiti di sicurezza, affidabilità, disponibilità, resilienza e privacy degli utenti [76].

In tale contesto l'integrazione dei sistemi BIPV costituisce uno degli elementi chiave della politica europea sul clima, offrendo maggiori opportunità in termini di investimenti e quote di mercato nello scenario dei nZEB. La riduzione progressiva del costo solare, l'aumento dell'efficienza dei moduli, nuovi modelli di business e un aumento della consapevolezza dei benefici derivanti dall'adozione dei BIPV rendono il fotovoltaico integrato un'opzione solare vantaggiosa, sia per gli utenti finali, che per le aziende che decidono di investire in queste tecnologie.

L'ultimo rapporto sul mercato globale BIPV pubblicato dalla società di analisi n-tech Research, intitolato *BIPV Market Forecast and Analysis 2018-2027*, prevede che il mercato mondiale del fotovoltaico integrato negli edifici raggiungerà circa 5,7 miliardi di dollari nel 2023 e 11,6 miliardi di dollari nel 2027 (Figura 27). Il rapporto analizza la domanda per i BIPV, esaminando l'evoluzione dei prodotti BIPV impiegati in diversi tipi di edifici (uffici di proprietà del governo, sedi aziendali, istituzioni educative, ospedali/cliniche, hotel/motel, aeroporti, edifici plurifamiliari, case di lusso, fabbriche e magazzini).

Il mercato globale BIPV è attualmente dominato dall'Europa, che ha una quota di circa il 40%, beneficiando della più alta disponibilità di consumatori a adottare pratiche ecologiche e rispettare i regolamenti sull'edilizia sostenibile, seguita da Nord America con il 27% delle installazioni annuali.

Sebbene la maggior parte delle opportunità BIPV rimarrà nel settore commerciale, il BIPV nel settore residenziale crescerà a un ritmo più rapido, fino a rappresentare il 15% del mercato mondiale entro il 2023, generando 872 milioni di dollari di ricavi. Per ora, gran parte dell'attività BIPV rimarrà nelle mani di imprenditori, costruttori e architetti locali, ma con la crescita dei ricavi emergeranno finalmente prodotti e marchi BIPV. Ci vorranno grandi investimenti da grandi aziende per far sì che ciò accada.

Secondo il rapporto, entro il 2023 i primi tre mercati geografici per BIPV saranno (in ordine di entità dei ricavi generati) Stati Uniti, Cina e Giappone, andando a costituire congiuntamente il 75% dei ricavi del mercato. Si prevede che sia la Cina che il Giappone genereranno oltre 1 miliardo di dollari di entrate nel 2023, con 2 miliardi di dollari da parte degli Stati Uniti. In questi ultimi, alcuni stati (in particolare la California) hanno forti mandati pro-solari. In Giappone i sentimenti anti nucleari combinati con una lunga tradizione di utilizzo del solare integrato aiutano ad alimentare la domanda BIPV.



Figura 27. Trend evolutivi del mercato globale BIPV [Fonte: n-tech Research].

Nell'ultimo decennio, la maggior parte degli sviluppi del mercato BIPV in Europa sono stati guidati da Francia e Italia, grazie all'attuazione di programmi di sostegno specifici per stimolare il settore BIPV [77]. In particolare, nel nostro paese il settore del fotovoltaico ha conosciuto una forte crescita nel giro di pochi anni, a partire dall'emanazione del Decreto Ministeriale del 19/02/2007, noto come II° Conto Energia, grazie al quale da poco più di 100 MW di installato nel 2007 si è giunti nel 2013 a circa 18 GW di capacità installata (caratterizzata dalla presenza di molteplici impianti di grandi dimensioni) [1], di cui circa 2,5 GWp di soli impianti BIPV [77]. Le disposizioni di incentivazione del Conto Energia non sono state più applicate dal 6 luglio 2013, dopo il raggiungimento del tetto di 6,7 miliardi di euro [78]. Si è così aperta una fase caratterizzata da installazioni di dimensioni più contenute, legate soprattutto al settore residenziale, anche per via dell'esistenza di sistemi di incentivazione indiretti (come le detrazioni fiscali del 50%) [1].

Le risposte che molte aziende stanno attuando per essere competitive e presenti sul mercato - sia della nuova edificazione che del recupero - sono orientate alla flessibilità, alla versatilità, alla specializzazione e alla risposta prestazionale complessa dei singoli prodotti e dei sistemi integrati. La corrente produzione a catalogo, basata su strategie di ottimizzazione dell'impiego delle risorse materiali ed energetiche, presenta evidenti potenzialità di innalzamento della *green quality* e di riduzione degli impatti, favorendo la rispondenza del progetto a requisiti di leggerezza, risparmio di risorse e compatibilità ambientale.

Gli obiettivi che saranno sempre più centrali nel corso dei prossimi anni saranno legati allo sviluppo di nuove tecnologie per le celle fotovoltaiche, al miglioramento delle performance di quelle già esistenti e all'espansione dei campi di applicazione di tale tecnologia. Proprio i possibili campi di applicazione che esulano dalla tradizionale produzione energetica sono quelli in grado di destare maggiore interesse, in quanto ancora aperti a numerose possibilità di sviluppo tuttora da definire.

Le ricerche si concentrano ora sulla realizzazione di celle solari o moduli flessibili, colorati, in grado di offrire elevata efficienza anche in caso di esposizione parziale alla luce o con cielo nuvoloso, oppure al miglioramento delle performance per una tecnologia fotovoltaica sfruttabile anche all'interno delle abitazioni. I moduli più diffusi sul mercato arrivano oggi massimo al 20% di efficienza di conversione, ma i continui miglioramenti dei processi e delle economie di scala portano a graduali miglioramenti in termini di costo-efficienza (Figura 28). La possibilità di realizzare dispositivi fotovoltaici a basso costo e ad alta efficienza rappresenta uno dei traguardi più ambiziosi per la ricerca scientifica.

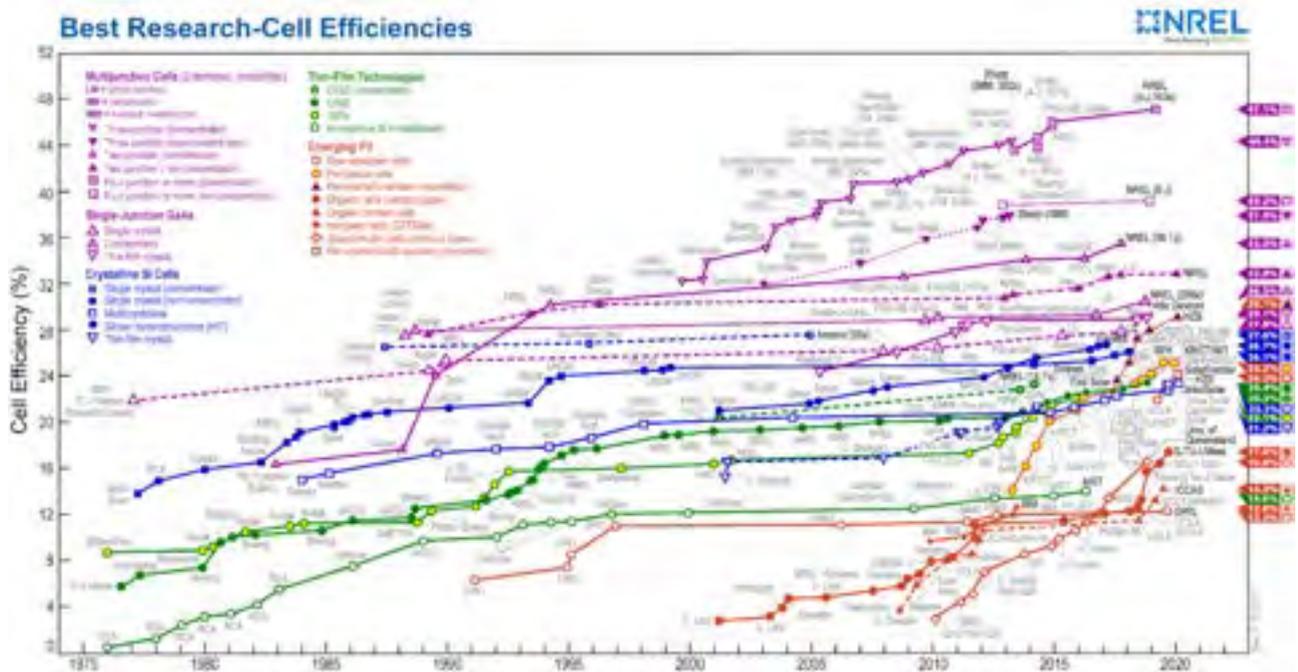


Figura 28. Diagramma relativo al miglioramento dell'efficienza delle celle fotovoltaiche disponibili sul mercato dal 1976 a oggi [Fonte: National Renewable Energy Lab, 2020].

### 3.2 Sistemi fotovoltaici integrati e progettazione tecnologica dell'architettura

Uno dei principali obiettivi della contemporaneità è lo sviluppo di un'architettura che sia legata alle molteplici problematiche ambientali secondo principi di ecosostenibilità, che non può prescindere dalla maggiore consapevolezza del ruolo e del "peso" degli aspetti energetici nel progetto. Nell'impostazione progettuale, i parametri della progettazione e i prodotti industrializzati per l'edilizia devono concorrere ai due obiettivi prioritari di:

- riduzione delle emissioni di agenti climalteranti;
- riduzione del fabbisogno energetico.

Con la riduzione del fabbisogno energetico si contribuisce, attraverso il miglioramento dell'efficienza energetica di dispositivi e sistemi e del comportamento "passivo" degli edifici, a contenere una possibile impennata della domanda di energia nel prossimo decennio. Infatti, dovendo progressivamente limitare il ricorso alle fonti fossili, la domanda crescente di energia non riuscirebbe ad essere soddisfatta soltanto con fonti rinnovabili e con un limitato ricorso alle fonti energetiche convenzionali. In ogni caso, i sistemi BIPV non necessitano di superfici extra all'edificio e hanno un costo parzialmente controbilanciato dal costo degli elementi edilizi che sostituiscono o delle nuove funzioni assolve oltre quella della produzione energetica.

L'architettura "solare", basata su sistemi fotovoltaici integrati, può contribuire a una trasformazione degli stili di vita e alla realizzazione di spazi abitabili indoor e outdoor innovativi e più strettamente interagenti con le tematiche ambientali e con la riduzione dell'inquinamento, delle cause del global warming e con l'adattamento agli impatti climatici. La progettazione basata su principi BIPV potrà, nelle sue applicazioni tecnologiche, contribuire a una ridefinizione del concetto di vivibilità rappresentando «un tema linguistico-configurazionale ben preciso, come è sempre stato quello dei materiali innovativi acquisiti dall'architettura in ogni epoca» [79].

Le sperimentazioni necessarie per innescare uno sviluppo significativo nella relazione qualità architettonica, qualità prestazionale e integrazione dei sistemi FV, possono riguardare una casistica di molteplici condizioni di carattere progettuale-architettonico:

- sistemi fotovoltaici ad alta visibilità nell'integrazione nell'involucro edilizio, sostituendo il concetto di elementi di progettazione "installati" con quello di elementi "espressi";
- caratteristiche architettoniche capaci di incorporare la componentistica FV secondo modalità non particolarmente evidenti, aprendo la R&D sulle ricadute per lo sviluppo di nuovi prodotti e di nuovi mercati;
- sistemi fotovoltaici con il potenziale di costituire elementi architettonici che possano rappresentare alternative concrete a sistemi e componenti edilizi di uso corrente;
- innovazione nel disegno architettonico degli elementi dell'involucro e della copertura finalizzati a una non solo alla produzione di energia elettrica ma anche all'implementazione dei risparmi energetici [79];
- sistemi fotovoltaici a basso impatto visivo e linguistico-espressivo, in cui i sistemi non esibiscono evidenti valenze morfologiche o estetiche.

Nell'integrazione, i sistemi FV devono rientrare in un approccio complessivo di tipo olistico per edifici progettati con la finalità di ridurre complessivamente il fabbisogno energetico e facendo in modo che il sistema FV non sostituisca soltanto dei componenti della costruzione o rappresenti un'integrazione unicamente estetica, ma risponda alla capacità di svolgere altre funzioni (per esempio la tenuta all'acqua, il controllo del fattore solare, la protezione dall'irraggiamento solare diretto tramite schermature solari che utilizzano la stessa radiazione per la generazione di energia elettrica, ecc.). Di pari passo con il progredire dei sistemi fotovoltaici - in particolare nel rendimento, nelle variazioni formali, nei materiali di supporto - si è evoluta anche la stessa capacità di integrazione con soluzioni dove non è definito, per esempio, il "confine" tra elemento di involucro ed elemento fotovoltaico [80].

La qualità tecnica - riferita alla capacità di soddisfare funzioni e standard edilizi tipici - dovrebbe parallelamente garantire gli aspetti morfologici delle soluzioni architettoniche. Una delle sfide progettuali più significative dovrà essere attuata per gli edifici nZEB - edifici a energia quasi zero introdotti dalla direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19/05/2010. Le caratteristiche che un edificio deve

avere per essere definito “edificio a energia quasi zero” sono state stabilite dal DM del 26 giugno 2015 “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”. Secondo quanto previsto dal decreto, sono “edifici a energia quasi zero” tutti gli edifici, sia di nuova costruzione che esistenti, per cui sono contemporaneamente rispettati tutti i requisiti prestazionali previsti dal decreto stesso e gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili previsti dal decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28. Per gli edifici nZEB si prevede che il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura particolarmente significativa non solo nelle vicinanze ma soprattutto in loco, interessando quindi l’intero involucro edilizio per raggiungere gli obiettivi prefissati.

Particolarmente nell’edilizia ex-novo, l'innovazione nel concept progettuale riguarda sia l'organizzazione planimetrica che quella tridimensionale, nonché le spazialità e l'interazione fra tutti gli elementi tecnici delle parti dell'organismo edilizio, chiamato a diventare un micro-generatore di elettricità ma anche a considerare in termini di minimizzazione dell’energia consumata per il suo metabolismo. Nel concept dell'edificio l'orientamento costituisce, per esempio, un fattore fondamentale per la progettazione delle facciate, per massimizzare da un lato l'efficienza dei sistemi fotovoltaici e dall'altro la capacità di controllo dei carichi termici indesiderati o dell'isolamento termico. I sistemi fotovoltaici vanno quindi considerati sempre insieme alle soluzioni progettuali di tipo passivo ed è necessario individuare fin dalle prime fasi di progettazione le opportunità e le sperimentazioni applicabili nel progetto del sistema FV, come parte integrante dell'edificio stesso [81].

Negli interventi di retrofit tecnologico, un fattore importante riguarda l'adattabilità alle diverse problematiche del costruito esistente, considerando i principi di tutela per l'edilizia storica o per il valore autoriale - nonché nel caso di punti di particolare visibilità ambientale - in cui l'inserimento del fotovoltaico deve essere attuato in termini quasi “sotto tono”, in modo da non interferire con il carattere architettonico degli edifici. Altro discorso può essere fatto per comparti edilizi esistenti di modesta qualità architettonica: in questo caso l'integrazione di sistemi fotovoltaici può rappresentare l'opportunità di una migliore caratterizzazione e migliori prestazioni tecnologiche e ambientali.

Se non si è in presenza di edifici di pregio storico-architettonico o caratterizzati da valori di autorialità, gli interventi di retrofit tecnologico, oltre a migliorare le prestazioni dell'involucro, possono così contribuire alla riconfigurazione architettonica dell'edificio non solo in termini di componenti tecnologici e funzionali, ma anche architettonici, estetici e di design. La riconfigurazione può condurre a edifici di nuova generazione di tipo smart con involucri intelligenti e adattivi, autosufficienti energeticamente, interattivi e dinamici in relazione alle azioni esterne e ai parametri microclimatici interni.

Gli interventi di retrofit tecnologico possono prevedere alcuni gradi di trasformazione più o meno spinti con interventi per *sottrazione* o *addizione* oltre che per integrazione di superfici o volumi. Sono numerosi gli esempi, prevalentemente internazionali, che operano con questa modalità al fine di modificare la configurazione dei volumi con lo scopo di migliorare contestualmente le prestazioni tecnologiche accanto alla qualità architettonica dell'esistente. Laddove non vi siano condizionamenti dovuti alla presenza di vincoli, è possibile optare per soluzioni innovative sul piano architettonico e di sperimentazione tecnologica, mirando a incrementare le superfici favorevolmente esposte al fine di superare le problematiche di un cattivo orientamento dei corpi di fabbrica originali. Altre soluzioni sono quelle delle addizioni superficiali, definite anche come *recladding*, che mirano alla realizzazione di una seconda pelle sulle chiusure perimetrali esistenti, conferendo un differente carattere architettonico e sviluppando molteplici funzioni, da quella di superfici microventilate a quella di isolamento termico, di protezione dalle precipitazioni meteoriche e fino alla produzione di energia elettrica [82].

Tema di fondo dell'attuale dibattito fra innovazione tecnologica nel campo del fotovoltaico integrato e caratteri architettonici degli edifici è quello del “peso” di tale innovazione che può risultare nascosta o esibita. Molto spesso nell’evoluzione storica del rapporto fra tecnologia e progetto si è in presenza di tale dicotomia. L'architettura della modernità ha fatto proprio il principio, per esempio, della “sincerità costruttiva” dei materiali da utilizzare e da manifestare secondo le loro peculiarità meccaniche, visive ed estetiche. In altri casi, rispetto al valore seriale e collettivo delle opere architettoniche, molti progettisti hanno optato per

fattori tecnologici di forte caratterizzazione morfologica e visti come elementi di distinzione, di autorialità, di stile. Il volersi distinguere ha spesso utilizzato - come per numerose *archistar* della contemporaneità - un branding della ricerca progettuale veicolato attraverso specifiche e visibili innovazioni tecnologiche. I sistemi fotovoltaici sono stati utilizzati in molte architetture secondo tale approccio.

Su un altro versante della ricerca progettuale si muovono posizioni critiche sull'eccesso di "firma" e su un formalismo architettonico che utilizza le tecniche come veicolo di potenzialità linguistiche. Queste posizioni guardano in generale alle tecniche non come un fattore visivo da esibire o come un elemento esteticamente "dirompente", ma secondo una relazione fra teoria progettuale e prassi e costruttiva, in cui le tecniche sono un elemento della coerenza complessiva del progetto. Tali obiettivi sono messi in campo non solo quando si opera su edifici in cui sono presenti valori storico-culturali, ma anche nei casi in cui si interviene in contesti ambientali sensibili, nei quali si richiedono interventi di particolare delicatezza. Le scelte progettuali prendono in considerazione, fra le opzioni tecnologiche disponibili, quelle più appropriate alle finalità individuate per contenerne l'impatto, pur nella efficacia degli interventi proposti, in relazione alle esigenze di salvaguardia dei caratteri ambientali, architettonici e costruttivi.

L'opzione fra una innovazione "esibita" e una innovazione "nascosta" interessa dunque, pariteticamente, gli interventi ex-novo e quelli di retrofit tecnologico su edifici esistenti. La scelta fra le due opzioni è riferita non solo alle caratteristiche degli edifici e dei contesti di intervento, ma soprattutto a una visione dell'architettura nell'adesione a specifici indirizzi progettuali e a scelte di campo. Nei termini oggettivi che considerano contesti o edifici di valore architettonico-ambientale, diventa inevitabile ricorrere a sistemi BIPV integrati in modo non evidente.

Al contrario, le scelte guidate da una adesione a specifici approcci al progetto di architettura delineano due principali strade di interventi con sistemi BIPV. La prima è occasione di denuncia evidente del contributo al carattere architettonico con la volontà di rendere palese la "sovrascrittura" con la tecnologia fotovoltaica. La seconda prevede un'assimilazione dei sistemi in termini di minimo impatto ed evidenza, scegliendo tecnologie e prodotti industrializzati a bassa caratterizzazione morfologica, tettonica ed estetica, che assecondano impostazioni progettuali basate sulle "ragioni" del progetto piuttosto che sulla esibizione del linguaggio architettonico.

### 3.3 Criteri e indicatori per la valutazione dell'integrabilità architettonica dei sistemi BIPV

L'impiego di tecnologie e prodotti innovativi nel progetto di architettura richiede specifici approfondimenti connessi al rapporto fra tecnologie di produzione, tecniche esecutive ed esiti progettuali, mettendo in evidenza il ruolo centrale dell'informazione e della conoscenza per la qualità degli interventi. L'utilizzo di prodotti e sistemi innovativi BIPV determina implicazioni non solo sul processo realizzativo ma sulla concezione del progetto, sulla sua qualificazione spaziale, sugli esiti morfologici e linguistico-espressivi. La concezione dell'edificio come un sistema integrato prelude al superamento di un edificio definito per parti funzionalmente distinte, fornendo risposte multiple, multifunzionali e integrate.

L'integrazione del fotovoltaico negli edifici è un problema complesso, la cui buona riuscita è legata alla competenza del progettista e alla scelta di sistemi e componenti fotovoltaici appropriati rispetto alle esigenze del progetto, e dunque valutati non solo secondo criteri di efficienza, ma soprattutto secondo criteri legati alla sua integrabilità morfologica [83]. L'impiego di un linguaggio architettonico è dunque fondamentale affinché i BIPV inizino a far parte del processo di progettazione architettonica come materiale da costruzione, e non come dispositivo tecnico aggiuntivo [84].

La norma UNI 8290-2:1983 definisce l'integrazione come "attitudine alla connessione funzionale e dimensionale" [85]. Tale definizione risulta parziale, in quanto non considera l'integrabilità architettonica anche nella sua accezione morfologica. Una corretta integrazione architettonica punta a ridefinire le regole morfologiche e linguistiche che governano la struttura e la composizione del linguaggio architettonico dell'edificio, coniugando la capacità del fotovoltaico di produrre energia elettrica con la qualità dello spazio che lo contiene [86]. La qualità dell'integrazione architettonica deve essere valutata dal punto di vista funzionale, costruttivo e morfologico, nelle sue caratteristiche geometriche, qualità materiche e cromatiche.

In tal senso, uno degli aspetti primari da analizzare, e dunque valutare, è quello "percettivo", inteso tuttavia non come fenomeno puramente visivo ma piuttosto come frutto di un'elaborazione culturale del dato sensoriale in funzione dei parametri estetico-formali della cultura del tempo. Integrare il fotovoltaico nell'architettura significa riuscire ad equilibrare le esigenze dovute agli aspetti tecnici della tecnologia fotovoltaica con il valore estetico-formale dell'edificio nella sua complessità, valore che deve essere rispettosamente preservato, se non addirittura incrementato dall'introduzione di nuovi "segni" [87].

Tutte le caratteristiche del sistema che influenzano l'aspetto dell'edificio hanno un impatto sulla qualità dell'integrazione e pertanto dovrebbero essere congruenti con il progetto complessivo dell'edificio. La valutazione delle molte qualità dell'integrazione delle tecnologie BIPV non è però di facile attuazione, in quanto non esistono strumenti univocamente condivisi a supporto del lavoro (propositivo) dei progettisti, e (valutativo) degli enti pubblici, quali soprintendenze e pubbliche amministrazioni, specie se si tratta di edifici tutelati, di valore architettonico o inseriti in contesti storici o di alto valore paesaggistico. Tra l'altro tali criteri, rapportandosi al concetto di percezione qualitativa, risultano legati a considerazioni interpretative e soggettive, e pertanto sempre riferite alla specificità dell'edificio oggetto di intervento o ad una più ampia idea di architettura, propria di un determinato contesto socio-culturale e di un determinato tempo (*genius loci*<sup>26</sup>).

Come più volte citato nel Task 41 [24], è preferibile adottare il concetto di *coerenza* delle soluzioni fotovoltaiche impiegate con il concept architettonico, piuttosto che puntare sulla valutazione della qualità oggettiva dell'installazione in sé, valutando l'armonia relazionale del sistema BIPV con la griglia compositiva dell'involucro e le sue caratteristiche tecnologiche e tipo-morfologiche. Per adattarsi a diversi edifici e contesti d'intervento, i sistemi fotovoltaici dovrebbero fornire la massima *flessibilità* in relazione ad una serie di parametri di integrazione architettonica; l'assunto di partenza è che ad una maggiore flessibilità e possibilità di personalizzazione (*customization*) offerta da un prodotto o soluzione, corrisponda un più

<sup>26</sup> Con la locuzione di *genius loci* si intende individuare l'insieme delle caratteristiche socio-culturali, architettoniche, di linguaggio, di abitudini che caratterizzano un luogo, un ambiente, una città. Un termine quindi trasversale, che riguarda le caratteristiche proprie di un ambiente interlacciate con l'uomo e le abitudini con cui vive questo ambiente. [Fonte: [https://it.wikipedia.org/wiki/Genius\\_loci](https://it.wikipedia.org/wiki/Genius_loci)].

elevato livello di coerenza progettuale e integrabilità con l'organismo architettonico potenzialmente raggiungibile [25].

Per poter valutare la potenziale integrabilità dei componenti fotovoltaici nell'edificio e l'efficacia delle soluzioni proposte occorre definire quali criteri generali dovranno essere rispettati per far sì che il sistema possa dirsi armonicamente integrato nel suo contesto. Partendo dai più interessanti esiti delle ricerche sul tema dell'integrazione architettonica dei sistemi e componenti BIPV (cfr. paragrafo 2.3), si è proceduto all'elaborazione critica di un set di criteri e indicatori sintetici di tipo qualitativo, tra loro interrelati, atti a descrivere gli aspetti di integrabilità architettonica riferibili ai diversi sistemi BIPV e ad esprimerne l'adeguatezza in rapporto al manufatto architettonico, in relazione alla presenza di determinate caratteristiche.

In particolare, i *criteri* di integrabilità architettonica sono finalizzati alla valutazione della coerenza del sistema BIPV impiegato con il manufatto architettonico alla scala di progetto, mentre gli *indicatori* rappresentano degli strumenti operativi utili ad effettuare una valutazione sulla preferibilità di un prodotto a confronto con altri simili, al fine di operare scelte coerenti con gli obiettivi di intervento, nel rispetto dei quattro criteri di integrabilità individuati.

L'utilizzo di tali criteri e indicatori consente di indagare le relazioni tra alcune prestazioni ritenute significative per l'integrabilità del fotovoltaico alla scala di progetto e le caratteristiche produttive e tecnologiche peculiari di ciascuna tecnologia o sistema che concorrono al raggiungimento di tale obiettivo, definendo quindi le possibilità di applicazione in architettura in relazione alle potenzialità o ai limiti tecnici di ciascuna di esse.

La verifica di soddisfacimento viene correlata alla presenza di determinate caratteristiche nel prodotto o soluzione BIPV, senza prevedere l'attribuzione di punteggi o pesi; la preferibilità di un prodotto BIPV dipende dalla rispondenza agli indicatori ritenuti prioritari ai fini della valutazione, che offrano un livello di personalizzazione adeguato rispetto agli obiettivi progettuali.

Si riporta di seguito il set di criteri e indicatori, descritti secondo blocchi di informazioni ricorrenti:

- *denominazione del criterio/dell'indicatore;*
- *descrizione del criterio/dell'indicatore;*
- *verifica di soddisfacimento del criterio/dell'indicatore:* espressione del criterio/dell'indicatore secondo attributi qualitativi, che consentono di valutare in che modo è possibile raggiungere l'obiettivo di integrabilità architettonica da parte di una soluzione BIPV, nell'ambito di applicazione in un progetto specifico (criteri), o di un prodotto BIPV (indicatori); la presenza di quanto descritto determina la verifica di soddisfacimento dell'indicatore.

<b>Criterio 1</b>	<b>Coerenza geometrica</b>
Verifica di soddisfazione (si/no)	Le dimensioni, la forma e la posizione dei moduli sono coerenti con la composizione architettonica d'insieme dell'edificio, nonché con le caratteristiche geometrico-dimensionali degli elementi tecnici appartenenti al subsistema tecnologico in cui sono integrati.
<b>Indicatore 1.1</b>	<b>Personalizzazione geometrica</b>
Verifica di soddisfazione (si/no)	Possibilità di ottenere moduli su misura, capaci di adattarsi perfettamente alle superfici su cui vengono installati, mediante un'offerta variegata dal punto di vista delle forme, geometrie e dimensioni.
<b>Indicatore 1.2</b>	<b>Disponibilità di dummies</b>
Verifica di soddisfazione (si/no)	Possibilità di ottenere elementi passivi ( <i>dummies</i> ) su misura, con caratteristiche geometriche, formali e cromatiche (struttura, modello, materiale di finitura, colore) identiche a quelle del modulo attivo, al fine di garantire continuità percettiva.

**Indicatore 1.1. Personalizzazione geometrica**

I moduli BIPV, compatibilmente con la tecnologia fotovoltaica impiegata, sono disponibili in una grande varietà di forme e dimensioni. I prodotti *standard* presentano in genere una gamma di produzione costituita da formati prestabiliti o limitatamente personalizzabili (Figura 29), mentre i moduli *custom* offrono la possibilità di ottenere moduli *su misura* nella forma, dimensioni, spessori, adattandosi a molteplici esigenze progettuali (Figura 30).

Per i prodotti con tecnologie fotovoltaiche in silicio cristallino, il modulo ha dimensioni caratterizzate dal rispetto della regola del multiplo della cella, che a sua volta può essere caratterizzata da forma e dimensioni personalizzabili. I moduli con tecnologia in film sottile, svincolati da dimensioni prestabilite, presentano una maggiore flessibilità geometrico-dimensionale, potendo essere potenzialmente prodotti in qualsiasi formato (purché compatibile con le linee produttive).

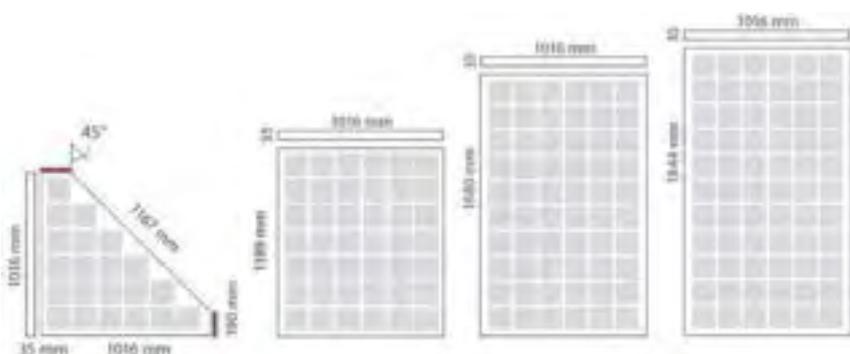


Figura 29. Moduli standard caratterizzati da diverse geometrie e dimensioni [Fonte: TRIENERGIA].



Figura 30. Moduli custom dalle geometrie e dimensioni personalizzabili [Fonte: ISSOL].

**Indicatore 1.2. Disponibilità di dummies**

I *dummies* sono elementi fittizi che presentano le stesse caratteristiche tecnologiche (prestazionali) e morfologiche (colore, struttura, modello, materiale di finitura) del modulo attivo, particolarmente utili per risolvere problematiche di tipo geometrico o da prevedere in alcune parti dell'involucro non adatte alla produzione di energia (ad esempio parti dell'involucro ombreggiate o non esposte adeguatamente al sole) [88].

<b>Criterion 2</b>	<b>Coerenza morfologica</b>	
<i>Verifica di soddisfacimento (si/no)</i>	La finitura visibile, la texture superficiale e l'eventuale pattern generato dalle celle solari del modulo sono coerenti e armonici con i materiali di finitura e le texture del sub-sistema tecnologico in cui sono integrati.	
<b>Indicatore 2.1</b>	<b>a. Personalizzazione del pattern</b> <i>(celle fotovoltaiche a vista)</i>	<b>b. Non percepibilità del sistema FV</b> <i>(tecnologie fotovoltaiche invisibili)</i>
<i>Verifica di soddisfacimento (si/no)</i>	Possibilità di controllo, progettazione e personalizzazione dei pattern generati dalla composizione delle celle solari come parte integrante e punto di forza del concept dell'involucro edilizio, di modo da favorire la coerenza e l'armonia con il sub-sistema in cui sono integrati.	Possibilità di nascondere la tecnologia fotovoltaica mediante l'impiego di accorgimenti tecnico-progettuali tendenti ad occultare le celle in silicio cristallino (film colorati/selettivi, serigrafie, vetri colorati, ecc.) o di tecnologie fotovoltaiche a film sottile.
<b>Indicatore 2.2</b>	<b>Personalizzazione della finitura</b>	
<i>Verifica di soddisfacimento (si/no)</i>	Possibilità di ottenere texture, finiture superficiali e gradi di opacità personalizzabili.	
<b>Indicatore 2.3</b>	<b>Possibilità di installazione senza cornice</b>	
<i>Verifica di soddisfacimento (si/no)</i>	Possibilità di escludere la cornice dalla progettazione e installazione del sistema BIPV (es. moduli vetro-vetro o rotoli flessibili).	

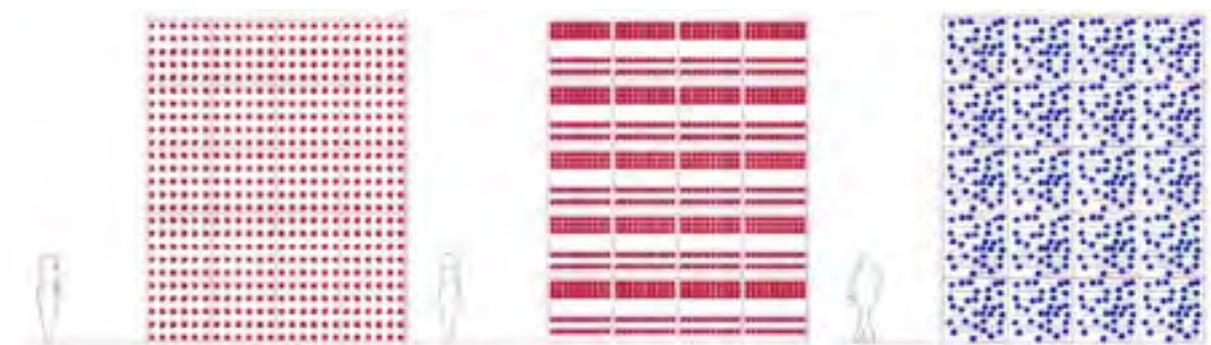
Le caratteristiche morfologiche del sistema dipendono fortemente dalla specifica tecnologia solare impiegata [24]. Per rendere visivamente accettabili e accattivanti i moduli fotovoltaici, la produzione si attesta su due ipotesi progettuali: mantenere la visibilità/riconoscibilità delle celle fotovoltaiche e utilizzarle come elemento di design, lavorando sul *pattern* (a) o rendere la cella FV "invisibile", mimetizzandola mediante l'adozione di accorgimenti progettuali e tecnologie in grado di nascondere (b) [89].

#### *Indicatore 2.1a. Personalizzazione del pattern*

L'immagine rigida associata al fotovoltaico di colore blu, in cui elementi identici (moduli/celle) sono organizzati in pattern ortogonali, è stato riconosciuto come una possibile barriera alla sua accettazione, specie in contesti di pregio o tutelati. La ricerca di nuovi linguaggi ha condotto alla proposta di geometrie alternative, ad esempio sostituendo la tipica griglia ortogonale con pattern a strisce orizzontali/verticali, o *random/pixelati*, sviluppati attraverso processi generativi basati sulla casualità (Figura 31) [90].

A ciascun pattern può essere associata una certa densità (o semi-trasparenza), corrispondente alla quantità di celle solari rilevabili per porzione unitaria di superficie ( $n^\circ$  celle/m<sup>2</sup>), e dunque alla potenza nominale del sistema (Wp/m<sup>2</sup>). Al crescere della semi-trasparenza, aumenta la flessibilità dell'articolazione geometrica, con migliori possibilità in termini estetico-formali; al tempo stesso, sarà osservata una perdita proporzionale di potenza del sistema [91].

Le celle a vista, utilizzate consapevolmente come elementi di design, nei moduli semi-trasparenti vetro-vetro costituiscono elementi preposti al controllo del fattore solare e del flusso luminoso, nonché al controllo della privacy, mediante la variazione della loro densità e distribuzione.



**Figura 31. Confronto tra diverse possibilità progettuali dei pattern FV basate sulle geometrie: griglia ortogonale, strisce orizzontali parallele, random [90; 91].**

*Indicatore 2.1b. Non percepibilità del sistema fotovoltaico*

La non percepibilità del sistema fotovoltaico può dipendere da due fattori:

- dalla tecnologia fotovoltaica utilizzata (es. film sottile);
- dall’occultamento delle celle solari mediante la personalizzazione della finitura superficiale (*indicatore 2.2*) o cromatica (*indicatore 3.1*).

I moduli in film sottile sono caratterizzati dalla non riconoscibilità della tecnologia fotovoltaica e da gradi di semitrasparenza personalizzabili; utilizzati per involucri vetrati, presentano il vantaggio di illuminare gli spazi interni, personalizzando il grado di schermatura e protezione dalle radiazioni UV e infrarosse, ma senza presentare alcuna differenza percettiva rispetto ad un vetro comune. La semitrasparenza è ottenuta grazie alla parziale rimozione dello strato attivo, mediante trattamento laser per i moduli in silicio amorfo (a-Si) e lucidatura a getto d’acqua combinata con sabbiatura a secco per i moduli in (di)seleniuro di rame indio gallio (CIGS); diversi gradi di trasparenza possono essere ottenuti anche con la tecnologia al tellururo di cadmio (CdTe) [92]. Ad una maggiore trasparenza corrisponde una minore potenza specifica ( $Wp/m^2$ ). Nel caso dei moduli con celle fotovoltaiche organiche (organic photovoltaic - OPV) o di Grätzel (dye-sensitized solar cell - DSSC), la semitrasparenza e la variabilità cromatica dipendono invece dallo spettro di assorbimento dei materiali specifici utilizzati come strato attivo [93].

A ciascuna tecnologia fotovoltaica corrispondono potenze nominali specifiche ( $Wp/m^2$ ) variabili, ma in tutti i casi la perdita di efficienza sarà proporzionale rispetto al grado di trasparenza.

*Indicatore 2.2. Personalizzazione della finitura superficiale*

Al fine di ottenere una migliore integrazione morfologica negli edifici esistenti e di avere maggiore scelta compositiva nel caso di nuove costruzioni, è possibile ricorrere alla personalizzazione delle finiture superficiali dei moduli fotovoltaici. Si riportano di seguito le tecniche più diffuse, classificate in base alla posizione dello strato interessato dal trattamento di finitura [92]:

- Prodotti con interlayer personalizzati. Pellicole graficamente personalizzate possono essere laminate direttamente all’interno del modulo (fungendo anche da incapsulante o da backsheet). È possibile utilizzare le tradizionali tecniche di stampa dell’industria grafica o inchiostri semitrasparenti, che consentono il passaggio della luce.
- Prodotti con finitura satinata e stampa su vetro. La superficie esterna del vetro subisce un trattamento di satinatura, apparendo matta o satinata; talvolta questa tecnica è abbinata alla serigrafia sul lato interno di immagini, disegni e texture che simulano l’aspetto dei materiali da costruzione tradizionali [93].
- Stampa digitale su vetro. Processo che consente di stampare inchiostri speciali sulle superfici in vetro per ottenere un’immagine o una texture personalizzata (anche in HD).
- Prodotti con vetro frontale strutturato, rigato o testurizzato. Occorre sempre fare attenzione alle possibili implicazioni in termini energetici di tali trattamenti superficiali: l’alterazione del vetro frontale porta a cambiamenti nel comportamento ottico della lastra di vetro, che potrebbe riflettere o assorbire una porzione dello spettro solare, riducendo la produzione energetica [93].

**Indicatore 2.3. Possibilità di installazione senza cornice**

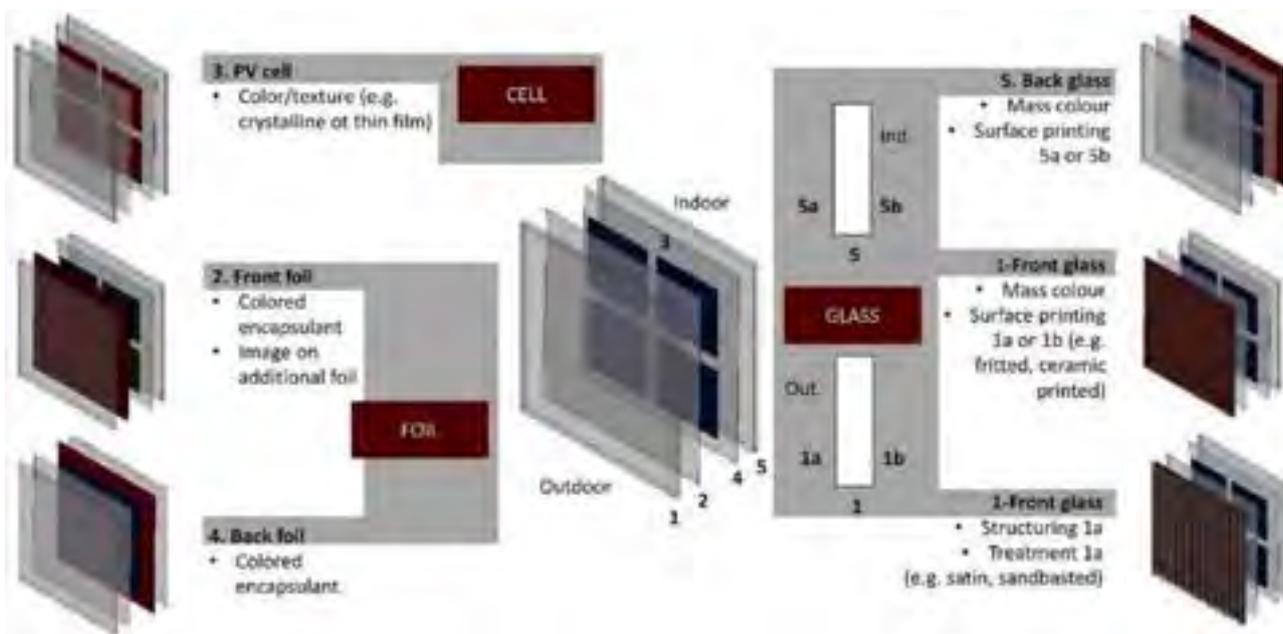
La cornice, generalmente in alluminio anodizzato naturale o verniciato, ha la funzione di migliorare la resistenza meccanica, la protezione e il fissaggio del modulo; la maggior parte dei moduli BIPV vetro-vetro sono montati senza cornice e provvisti di sigillatura polimerica in corrispondenza dei bordi, per impedire l'ingresso di umidità dall'esterno; alcuni moduli sono protetti con un telaio in alluminio collegato tramite un adesivo silconico [88].

<b>Criterio 3</b>	<b>Coerenza cromatica</b>
Verifica di soddisfazione (si/no)	I colori dei componenti dei moduli sono coerenti e armonici con i colori del sub-sistema tecnologico in cui sono integrati.
<b>Indicatore 3.1</b>	<b>Personalizzazione cromatica</b>
Verifica di soddisfazione (si/no)	Possibilità di optare tra diversi colori disponibili o di richiedere colorazioni personalizzate; tale indicatore è applicabile a ciascuno dei componenti del modulo fotovoltaico (celle, front cover, back cover, incapsulanti, interlayer, ecc.).

**Indicatore 3.1. Personalizzazione cromatica**

Al fine di ottenere una migliore integrazione cromatica negli edifici esistenti e di avere maggiore scelta compositiva nel caso di nuove costruzioni, è possibile ricorrere alla colorazione dei moduli fotovoltaici. Data la riduzione della luce incidente sulle celle fotovoltaiche dovuta ad una eventuale colorazione, la sfida consiste nell'ottimizzare le prestazioni tecnologiche, morfologiche ed energetiche, senza eccessive perdite di efficienza. Si riportano di seguito le tecniche più diffuse per ottenere prodotti BIPV colorati, classificate in base allo strato del modulo su cui è applicata la colorazione (Figure 32 e 33) [92]:

- Prodotti con rivestimenti antiriflesso colorati sulle celle solari (cella solare, c-Si);
- Prodotti con strati attivi colorati (cella solare, film sottile);
- Prodotti con interlayer colorati e pellicole solari selettive (interlayer);
- Prodotti con film polimerici colorati (incapsulante, backsheet);
- Prodotti con vetro frontale stampato o colorato (front glass).



**Figura 32. Possibilità di personalizzazione cromatica di un componente vetro-vetro BIPV per ottenere un aspetto colorato. Le celle possono essere visibili o nascoste [88].**



**Figura 33. Possibili stratificazioni di moduli BIPV colorati, in cui si evidenziano le molte possibilità tecnologiche relative all'integrazione del colore, evidenziato in rosso [89].**

**a. Prodotti con rivestimenti antiriflesso colorati sulle celle solari (c-Si)**

La superficie del materiale semiconduttore in silicio cristallino presenta valori di riflettanza elevati (circa il 30%, variabile in base all'indice di rifrazione), che comportano una perdita di produzione energetica; per tale motivo si ricorre al rivestimento delle celle con un filtro antiriflesso (AR), il cui spessore influisce sul colore delle stesse. Ad una cella di colore blu (standard) corrisponde uno spessore dello strato AR ottimizzato per ridurre al minimo i riflessi e massimizzare l'efficienza di conversione. La variazione cromatica della cella (Figura 34), a fronte di vantaggi di natura estetico-formale, comporterà però un costo maggiorato, oltre ad una riduzione dell'efficienza di conversione [94; 92].

Per aumentare il livello di coerenza cromatica, è importante che anche i connettori delle celle siano colorati, o che siano impiegati connettori sottili in modo da essere meno evidenti [89].

Poiché i produttori di celle sono generalmente restii nel produrre piccoli lotti per clienti specifici a prezzi competitivi, questa soluzione oggi non è molto diffusa [77].

**b. Prodotti con strati attivi colorati (cella solare, film sottile)**

Si tratta di moduli che impiegano celle fotovoltaiche organiche (organic photovoltaic - OPV) o di Grätzel (dye-sensitized solar cell - DSSC), la cui variabilità cromatica dipende dallo spettro di assorbimento dei materiali specifici utilizzati come strato attivo [93].



**Figura 34. Cella standard in silicio policristallino e celle dal colore personalizzabile in silicio monocristallino (sinistra) e policristallino (destra) [Fonte: LOF SOLAR].**

**c. Prodotti con interlayer colorati e pellicole solari selettive**

Un'ulteriore opzione per ottenere moduli BIPV colorati consiste nell'utilizzare interlayer colorati o filtri solari speciali, che possono essere laminati direttamente nei moduli [92; 93].

- **Interlayer colorato:** può essere laminato direttamente all'interno del modulo, fungendo da incapsulante o da backsheet. È possibile utilizzare le tradizionali tecniche di stampa su pellicola dell'industria grafica o inchiostri semitrasparenti, che consentono il passaggio della luce.
- **Pellicola solare selettiva:** applicata sulla parte anteriore delle celle, riflette e diffonde la radiazione solare all'interno dello spettro visibile, conferendo un aspetto bianco (o del colore a scelta) al modulo, mentre la parte infrarossa viene trasmessa al semiconduttore e convertita in elettricità (Figura 35), con una riduzione dell'efficienza di circa il 40% rispetto ad un modulo comparabile senza filtro.

**d. Prodotti con film polimerici colorati (incapsulante, backsheet)**

Lo sfondo dei moduli tradizionali è solitamente bianco o nero, è però possibile personalizzarlo, cambiando il colore del materiale incapsulante o della cover posteriore (backsheet); agendo sul lato posteriore si evita di incorrere in eventuali riflessioni o assorbimenti indesiderati di energia nell'intervallo dello spettro visibile, che potrebbero portare alla riduzione dell'efficienza dei moduli [93].

Spesso i progettisti escludono la possibilità di utilizzare moduli fotovoltaici integrati in involucri vetriati non solo per l'aspetto anteriore dei moduli (celle a vista), ma anche per il lato posteriore, percepito negativamente dagli utenti [92].

Oltre alla possibilità di personalizzare la trasparenza del film sottile, è possibile variare il colore dell'incapsulante posteriore, utilizzando uno strato in EVA (Etilene Vinil Acetato) o PVB (Polivinilbutirrale) colorato (Figura 36) [92]; la colorazione dell'incapsulante anteriore andrebbe sempre evitata, poiché comporta una riduzione della quantità di radiazione solare trasferibile alle celle fotovoltaiche, con una conseguente perdita in termini di produzione energetica [94].



**Figura 35. Laminazione della pellicola solare selettiva sulle celle fotovoltaiche [Fonte: SOLAXESS].**

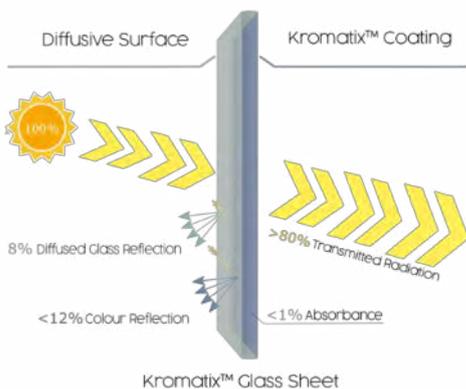


**Figura 36. Gamma di colori disponibili per moduli traslucidi in silicio amorfo con PVB colorato [Fonte: ONYX SOLAR].**

e. Prodotti con vetro frontale stampato o colorato

Una nuova tendenza è quella di utilizzare diversi trattamenti superficiali applicati direttamente alla copertura del vetro frontale per ottenere il colore, come è consuetudine nel settore edile. Vengono descritte di seguito le tecniche più comuni [92].

- Filtro interferenziale selettivo. Un rivestimento multistrato depositato mediante sputtering sulla superficie interna del vetro anteriore consente la riflessione e la percezione di un colore specifico, derivante dai filtri ottici interferenziali spettralmente selettivi che lo costituiscono; la percezione della tonalità varia a seconda dell'angolo di incidenza della luce e dell'angolo di osservazione (Figure 37 e 38); più dell'80% della luce solare viene trasmessa alle celle sottostanti, con limitatissime perdite di efficienza (dal 3 all'8%, a seconda delle lunghezze d'onda che vengono riflesse). Non vengono utilizzati pigmenti o coloranti, in modo che il colore non sbiadisca col tempo, a causa dell'esposizione al sole. Lo speciale trattamento della superficie esterna del vetro consente una riflessione diffusa e un aspetto satinato, per rafforzare l'effetto mascherante delle parti attive dei componenti solari e prevenire gli effetti di abbagliamento [94].
- Vetro smaltato colorato a base di ceramiche. Il colore viene ottenuto mediante l'applicazione di una pasta ceramica sul vetro anteriore prima della tempera, che aderisce saldamente ad esso in fase di cottura degli additivi. Stampando un motivo punteggiato, una sufficiente quantità di luce può raggiungere le celle.
- Finitura satinata e stampa su vetro. Il vetro anteriore subisce un trattamento di satinatura, talvolta abbinata alla serigrafia sul lato interno, ottenendo una superficie colorata matta o satinata.
- Rivestimento minerale. La colorazione può essere ottenuta mediante un processo di rivestimento minerale stabilizzato sulla superficie del vetro ad una temperatura molto elevata, legandosi strutturalmente ad esso. La scelta cromatica è in questo caso più limitata.
- Vetro colorato in massa. Può essere utilizzato come vetro frontale in qualsiasi prodotto BIPV, ottenendo moduli semitrasparenti o opachi. Anche in questo caso si ha una scelta cromatica limitata, il colore e la trasparenza più appropriati devono essere studiati al fine di ottimizzare la produzione energetica.



**Figura 37. Schema di funzionamento del vetro a cui è applicato il filtro interferenziale Kromatix [Fonte: SWISSINSO].**



**Figura 38. I moduli con vetri Kromatix appaiono di una differente tonalità al variare dell'angolo di osservazione [Fonte: SWISSINSO].**

**Criterio 4 Coerenza dell'installazione**

Verifica di  
soddisfaccimento  
(si/no)

I sistemi di giunzione e di fissaggio sono attentamente considerati in fase di progettazione e installazione del sistema, e sono coerenti con le sottostrutture, i supporti e con le caratteristiche dimensionali, costruttive e morfologiche del sub-sistema di cui fanno parte.

**Indicatore 4.1 Flessibilità di installazione**

Verifica di  
soddisfaccimento  
(si/no)

Possibilità di impiegare i moduli in diverse posizioni (inclinati, orizzontali, verticali) e/o parti dell'edificio (facciata, copertura, elemento schermante, etc.), adottando sistemi di fissaggio compatibili con il tipo di applicazione; possibilità di impiegare modalità di posa in opera, montaggio e installazione che prevedano lavorazioni semplificate nel numero e nel grado di complessità; possibilità di impiegare moduli che si adattino a qualsiasi tipo di superficie.

*Indicatore 4.1. Flessibilità di installazione*

In generale, le modalità di installazione di sistemi e componenti BIPV non presentano particolari difficoltà costruttive rispetto alle soluzioni tecniche previste per la posa di materiali e componenti per l'edilizia di analogo impiego, garantendo in fase d'opera il rispetto dei requisiti di stabilità meccanica, flessibilità, sicurezza, affidabilità, impermeabilità, ecc.

Bisogna prestare particolare attenzione all'integrazione tecnologica del cablaggio e dei componenti elettronici (come le scatole di giunzione), e alle eventuali implicazioni relative all'insorgere di criticità costruttive, di tipo estetico o legate alla sicurezza antincendio. Per tutte le categorie di installazione esistono diverse soluzioni per la gestione dei componenti elettrici, adattabili caso per caso [89]. Le possibili interferenze di telai, ganci, zavorrature e fissaggi dei sistemi BIPV con i diversi subsistemi edilizi o la potenziale scarsa efficacia di questi sistemi in particolari contesti (es. aree molto nevose o ventose con carichi elevati) sono solo alcuni esempi rispetto ai quali appare cruciale l'importanza di una corretta informazione a supporto del processo progettuale [84].

Il sistema di fissaggio dei moduli, sia di tipo standard che realizzati ad hoc, gioca un ruolo primario e consiste solitamente in un kit di montaggio/ancoraggio; il produttore fornisce una descrizione del sistema e un manuale di installazione, in cui si riportano informazioni circa l'intero kit di componenti (profili, cornici, ganci, morsetti, ecc.), dettagli costruttivi, la descrizione delle fasi di installazione e le procedure di montaggio.

In generale, i moduli flessibili (con tecnologia in cristallino o film sottile) presentano una maggiore flessibilità di installazione e adattabilità a qualsiasi tipo di supporto e superficie (Figura 39).



**Figura 39. Moduli flessibili, adattabili a qualsiasi superficie, in film sottile (a sinistra) o con celle in silicio cristallino (a destra) [Fonti: GENERAL SOLAR PV, SOLBIAN].**

### 3.4 *Cataloghi di prodotti e casi studio BIPV*

Nell'ambito su delineato, al fine di tracciare uno stato dell'arte sull'impiego dei BIPV in Italia e in Europa nel campo dell'edilizia ex-novo e del retrofit tecnologico, individuando le principali caratteristiche morfologiche e tecnologiche delle installazioni, e di fornire un supporto a progettisti e installatori verso la selezione di sistemi e componenti edilizi BIPV appropriati, si è proceduto ad effettuare una duplice schedatura.

Una prima schedatura riguarda i *prodotti BIPV* presenti sul mercato italiano, rappresentativi delle principali categorie di applicazioni nel progetto di architettura, con informazioni circa le prestazioni e le caratteristiche di integrazione architettonica degli stessi, facendo emergere i vantaggi applicativi e i plus prestazionali offerti mediante l'adozione degli *indicatori* di integrabilità architettonica.

I dati di input necessari alla redazione delle schede prodotto sono desunti dalla documentazione tecnica e dal materiale informativo fornito dalle aziende, opportunamente uniformato per consentire una comparazione tra i dati e le prestazioni offerte da prodotti tipologicamente simili; la letteratura tecnico-scientifica in materia di produzione per l'edilizia, nonché i dati raccolti nel corso di seminari e incontri di aggiornamento tecnico-professionale promossi da alcune tra le più conosciute realtà produttive del nostro paese, forniscono un adeguato apparato teorico-conoscitivo ad integrazione dei dati di natura tecnico-scientifica (*Catalogo di prodotti BIPV*). Sebbene il numero di prodotti studiati non possa considerarsi esaustivo in rapporto alla variegata offerta di mercato, viene fornito un campione d'indagine sufficientemente ampio da includere le tipologie merceologiche maggiormente ricorrenti di sistemi BIPV destinati all'integrazione nell'involucro edilizio.

La seconda schedatura riguarda l'analisi di riferimenti progettuali nazionali e internazionali "esemplari" dal punto di vista dell'integrazione del BIPV nel concept progettuale dell'edificio, esplicitati in termini di rispetto dei *criteri* di integrabilità architettonica. Quest'ultima, al pari del catalogo di prodotti BIPV, è tesa a fornire un quadro sintetico di informazioni organizzate utili alla conoscenza delle principali caratteristiche tipomorfologiche e tecnologiche delle applicazioni dei sistemi BIPV all'interno di organismi edilizi, sia per edifici di nuova costruzione che per interventi di retrofit tecnologico.

L'obiettivo è rilevare la correlazione tra la qualità architettonica degli edifici in cui è stato integrato il fotovoltaico, le caratteristiche morfo-tipologiche degli edifici e dei contesti di intervento e le soluzioni BIPV impiegate, al fine di stabilirne la potenziale riproducibilità in progetti futuri.

I casi studio, desunti dalla consultazione di diverse fonti, tra cui pubblicazioni su riviste scientifiche, progetti di ricerca europei, database di casi studio (cfr. paragrafo 2.3), ed esempi di applicazioni reperibili sui siti web, sono stati analizzati e riportati adottando due distinte modalità descrittive.

Al primo gruppo appartengono i cosiddetti "casi di successo" (*success stories*), descritti in forma di schede sintetiche, da cui è possibile reperire informazioni speditive in merito alle soluzioni adottate e ai prodotti utilizzati. I suddetti casi sono stati desunti prevalentemente dalla consultazione dei database esistenti e presentati in forma di immagini significative e grafici di dettaglio, corredati da una tabella sintetico-riepilogativa riportante alcuni dati salienti relativi al progetto e al sistema BIPV impiegato (*Catalogo di "Casi di successo" BIPV*).

Nell'ambito dei casi di successo, sono stati selezionati alcuni progetti, definiti "buone pratiche" (*good practice*)<sup>27</sup> e raccontati in forma di schede analitiche, per la cui elaborazione si è proceduto all'acquisizione di informazioni approfondite su obiettivi di progetto, risultati conseguiti, criticità riscontrate e soluzioni BIPV adottate, ove possibile mediante contatti diretti con studi di progettazione, aziende produttrici e professionisti del settore; queste ultime, opportunamente sistematizzate e generalizzate, potrebbero essere

---

<sup>27</sup> Si è deciso di privilegiare la denominazione di "buone pratiche", ossia "good practice", rispetto a "best practice", dal momento che "best" non presuppone margini di miglioramento e pare attribuire un livello ottimale al caso o alla pratica senza tenere conto dello specifico contesto in cui si è realizzata. Si ritiene che le buone pratiche siano in generale più agevolmente trasferibili da una realtà ad un'altra, mentre il concetto di "best" comporta una più difficile replicabilità al di fuori del contesto di osservazione [Fonte: Sistema Piemonte].

potenzialmente adattabili e replicabili in situazioni e contesti analoghi a quello in cui il risultato è stato positivamente conseguito. (*Catalogo di "Buone pratiche" BIPV*).

Per poter classificare e catalogare i sistemi BIPV, si è partiti dalla scomposizione del sistema tecnologico operata dalla norma UNI 8290-1:1981 [95] e dal report *Categorization of BIPV applications*, uno dei più recenti documenti redatti nell'ambito dell'IEA PVPS Task 15, Subtask B, da cui sono state desunte le esatte nomenclature da utilizzare, a vantaggio di un linguaggio condiviso [88].

Si è deciso di adottare un parametro classificatorio di tipo tecnologico-funzionale, identificando i sistemi BIPV a partire dal sub-sistema tecnologico in cui si osserva l'integrazione di uno strato funzionale destinato alla produzione di energia elettrica. Per ciascuna delle macrocategorie funzionali (Unità Tecnologiche: Copertura, Facciata, Dispositivi Esterni Integrati) si individuano delle parti costitutive del sistema tecnologico (Classi di Elementi Tecnici), che andranno ad identificare univocamente i componenti del sistema interessati dall'integrazione fotovoltaica (Tabella 3).

**Tabella 3. Unità tecnologiche con rispettive classi di elementi tecnici.**

Unità Tecnologiche	Classi di Elementi Tecnici	<i>Categorization of BIPV applications</i>
<b>COPERTURA ROOF</b>	<b>C1</b> copertura discontinua	<b>discontinuous roof</b> (cold roof, shingled roof, pitched roof, sloped roof)
	<b>C2</b> copertura continua	<b>continuous roof</b> (flat roof, planar roof, low-sloped roof)
	<b>C3</b> copertura vetrata / atrio / lucernario	<b>atrium / skylight</b> (glazed roof, (semi)transparent roof)
<b>FACCIATA FAÇADE</b>	<b>F1</b> facciata continua	<b>curtain wall</b> (warm façade)
	<b>F2</b> facciata ventilata	<b>rainscreen façade</b> (cold façade, ventilated façade)
	<b>F3</b> facciata a doppia pelle	<b>double skin façade</b> (second skin)
	<b>F4</b> serramento	<b>window</b> (fenestration)
<b>DISPOSITIVI ESTERNI INTEGRATI EXTERNAL INTEGRATED DEVICES</b>	<b>D1</b> parapetto / coronamento	<b>parapet</b> (balustrade, railing)
	<b>D2</b> frangisole / schermature solari	<b>solar shading</b> (louvres, brise-soleil, shading devices, shutters, blinds)
	<b>D3</b> pensilina / tettoia / pergola	<b>canopy</b> (shelter, pergola)

Al fine di agevolare la lettura e la comprensione di quanto descritto, si riporta di seguito un glossario tecnico di riferimento, che armonizza la classificazione proposta dal Task 15, Subtask B [88] con il sistema definitorio fornito dalla norma UNI 8290.

- *Unità tecnologica*: raggruppamento di funzioni, compatibili tecnologicamente, necessarie per l'ottenimento di prestazioni ambientali finalizzate a soddisfare esigenze dell'utenza.
- *Classe di elementi tecnici*: insieme di prodotti edilizi che configurano modalità di risposta complessiva o parziale alle funzioni delle unità tecnologiche, tali da evitare il più possibile soluzioni precostituite.
- *Elemento tecnico*: prodotto edilizio più o meno complesso capace di svolgere completamente o parzialmente funzioni proprie di una o più unità tecnologiche e che si configura come componente caratterizzante di un subsistema tecnologico.
- *Involucro edilizio*: insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici che morfologicamente e funzionalmente definiscono il limite tra l'ambiente interno (insieme di unità ambientali ed elementi spaziali che devono garantire il soddisfacimento delle esigenze dell'utenza) e l'ambiente esterno

(contesto ambientale, condizioni al contorno) di un organismo edilizio, avente la funzione di mediare, separare e connettere l'interno con l'esterno.

- *Copertura (chiusura superiore):* insieme degli elementi tecnici orizzontali e sub-orizzontali dell'involucro edilizio aventi funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio dallo spazio esterno sovrastante.
- *Facciata (chiusura verticale):* insieme degli elementi tecnici verticali dell'involucro edilizio aventi funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio rispetto all'esterno.
- *Dispositivi esterni integrati (partizioni esterne):* insieme degli elementi tecnici orizzontali/verticali/inclinati del sistema edilizio aventi funzione di dividere e articolare gli spazi interni connessi con il sistema edilizio stesso.

Partendo dal presupposto che il componente o sistema BIPV sostituisce un elemento tecnico o un raggruppamento di elementi tecnici, dovranno essere determinate le prestazioni che dovrà assicurare, e conseguentemente i requisiti tecnologici connotanti ad esso correlati [85; 96]. L'integrazione non implica necessariamente che il modulo sostituisca tutti gli strati funzionali, pertanto la sua complessità (tradotta nel set di requisiti connotanti) è proporzionale alla complessità tecnologica dello strato sostituito [83].

Di seguito la lista completa di tutti i possibili requisiti connotanti i componenti e sistemi BIPV, rapportati alle corrispondenti esigenze o classi di esigenze e completi di una breve linea di indirizzo per una corretta progettazione tecnologica (Tabella 4). Per snellire la struttura delle schede, si è deciso di riportare solo i requisiti peculiari della soluzione analizzata, ritenendo implicitamente soddisfatti tutti i requisiti essenziali ai fini del corretto funzionamento del sub-sistema tecnologico nel suo complesso.

**Tabella 4 - Esigenze e requisiti tecnologici connotanti i sistemi BIPV [85; 96].**

<b>Esigenza</b>	<b>SICUREZZA STRUTTURALE</b>
<i>Requisito</i>	<b>Resistenza meccanica e stabilità</b> Idoneità a contrastare efficacemente il prodursi di rotture o deformazioni gravi sotto l'azione di determinate sollecitazioni.
<i>Linea di indirizzo</i>	<i>Tutti i BIPV sottoposti ad azione diretta di carichi statici e dinamici o di urti volontari (come atti vandalici) e accidentali non devono subire danni (spostamenti, rotture, crolli totali o parziali, distacchi di parti, ecc.) tali da mettere in pericolo l'incolumità degli utenti.</i>
<b>Esigenza</b>	<b>SICUREZZA IN CASO D'INCENDIO</b>
<i>Requisito</i>	<b>Resistenza al fuoco</b> Attitudine a conservare, entro limiti determinati, per un intervallo di tempo determinato, le prestazioni fornite.
<i>Requisito</i>	<b>Reazione al fuoco</b> Grado di partecipazione di un materiale combustibile ad un fuoco al quale è sottoposto.
<i>Linea di indirizzo</i>	<i>I sistemi BIPV devono possedere una limitata infiammabilità e, sotto l'azione del fuoco, non devono emettere sostanze aeriformi, polveri tossiche, fumi, ecc., tali da provocare danni agli utenti o da impedire loro di trovare le vie di fuga. Inoltre, sotto l'azione del fuoco, non devono perdere le prestazioni di sicurezza e stabilità per un periodo di tempo sufficiente affinché gli utenti si possano mettere in salvo.</i>
<b>Esigenza</b>	<b>GESTIONE</b>
<i>Requisito</i>	<b>Affidabilità, durabilità, riparabilità, sostituibilità</b> Attitudine a ripristinare l'integrità, la funzionalità e l'efficienza di parti o di oggetti guasti o, nel caso non siano riparabili, a consentire la collocazione di elementi tecnici al posto di altri.

Linea di indirizzo	<p><i>Il periodo di garanzia tipico per le prestazioni elettriche di un modulo FV standard è compreso tra 20 e 30 anni. I moduli BIPV (compresi i loro componenti di incapsulamento e sigillatura) dovrebbero avere almeno lo stesso livello di durata e affidabilità per ciascuna funzione (ad es. resistenza meccanica, resistenza ai raggi UV, sicurezza, proprietà elettriche, impermeabilità all'acqua e all'aria) dei materiali da costruzione convenzionali equivalenti (materiali senza funzioni di produzione di energia elettrica).</i></p> <p><i>I sistemi BIPV devono essere progettati e realizzati in modo da garantire la facile riparazione di quelle parti soggette a rottura, così da aumentare la durata di vita utile dell'impianto nel suo insieme; nel caso di obsolescenza o nel caso in cui non sia possibile la riparazione dovrà essere consentita la facile sostituzione dei moduli danneggiati senza la necessità di eseguire operazioni di adattamento o di ripristino dell'intero sistema.</i></p> <p><i>Idealmente, un sistema BIPV dovrebbe funzionare per tutta la vita utile dell'edificio, mantenendo tutte le funzioni sia come componente edilizio che come generatore elettrico.</i></p>
Requisito	<p><b>Manutenibilità, pulibilità e limitazione dell'imbrattamento</b></p> <p>Attitudine a consentire la rimozione di sporcizia e sostanze indesiderate.</p>
Linea di indirizzo	<p><i>La manutenzione deve essere eseguita senza compromettere il comfort o la sicurezza degli abitanti o dell'edificio stesso, con un costo paragonabile al costo di manutenzione di componenti simili dell'involucro edilizio.</i></p> <p><i>Devono essere eliminate o limitate le possibili riduzioni di rendimento dei moduli BIPV causate dall'accumulo di sporco o per il deposito di agenti atmosferici e/o inquinanti o di sostanze trasportate dal vento, prevedendo frequenti sistemi di manutenzione e pulizia, o evitando di installare BIPV in aree in cui la probabilità di sporcarsi è alta (ad esempio al piano terra, dove l'accumulo di sporco o possibili atti vandalici potrebbero inficiare il funzionamento dell'intero sistema).</i></p> <p><i>Per ottimizzare i costi operativi, i vari problemi di manutenzione dovrebbero essere considerati nelle prime fasi di progettazione. L'ispezione del sistema e la manutenzione dovrebbero essere eseguite almeno una volta all'anno, mentre il monitoraggio delle prestazioni del sistema dovrebbe essere continuo durante l'intera vita utile.</i></p>
<b>Esigenza</b>	<b>BENESSERE MICRO-CLIMATICO</b>
Requisito	<p><b>Isolamento termico</b></p> <p>Attitudine dell'elemento tecnico ad assicurare un'opportuna resistenza al passaggio di calore in funzione delle condizioni climatiche, al fine di garantire il benessere microclimatico degli utenti.</p>
Linea di indirizzo	<p><i>Tutti i BIPV deputati alla separazione tra ambienti interni riscaldati e spazi esterni (es. facciate continue o coperture vetrate) dovranno essere progettati in modo che, attraverso la collaborazione di tutti gli strati componenti, siano garantiti valori di trasmittanza adeguati ad assicurare il necessario contributo al raggiungimento e mantenimento del benessere termico.</i></p>
Requisito	<p><b>Controllo della condensazione interstiziale</b></p> <p>Attitudine dell'elemento tecnico ad evitare la formazione di acqua di condensa.</p>
Linea di indirizzo	<p><i>Occorre prevedere una corretta stratigrafia dell'involucro, al fine di evitare che la presenza del modulo BIPV costituisca un impedimento al passaggio del vapore, contribuendo così alla formazione di fenomeni di condensa.</i></p>
Requisito	<p><b>Ventilazione</b></p> <p>Attitudine dell'elemento tecnico a consentire ricambio d'aria per via naturale o meccanica.</p>
Linea di indirizzo	<p><i>Il rendimento dei moduli BIPV si considera ottimale ad una temperatura operativa di circa 25°C; un eccessivo surriscaldamento può provocare una riduzione fino al 10% della potenza erogata dal sistema (in particolare per i moduli in cristallino). Bisogna quindi prevedere una adeguata ventilazione sul retro del modulo, che ne favorisca il raffrescamento passivo.</i></p>
Requisito	<p><b>Controllo del fattore solare, Riscaldamento passivo tramite guadagni solari</b></p> <p>Attitudine dell'elemento tecnico (opaco/semitrasparente) a regolare l'ingresso di energia termica raggianti in funzione delle condizioni climatiche, al fine di garantire il benessere microclimatico degli utenti.</p>

<i>Linea di indirizzo</i>	<i>È opportuno considerare gli aspetti legati al contesto ambientale, dipendenti da posizione, orientamento e condizioni climatiche, al fine di regolare, attraverso una corretta progettazione stratigrafica dell'elemento BIPV (es. inserendo pellicole basso-emissive o selettive all'interno del vetrocamera), la quantità di calore in entrata.</i>
<b>Requisito</b>	<b>Controllo del fattore di albedo</b> Attitudine dell'elemento tecnico a regolare la frazione di radiazione solare incidente riflessa.
<i>Linea di indirizzo</i>	<i>In fase di progettazione può essere conseguito un incremento della radiazione incidente sul sistema BIPV, e dunque della sua produttività, attraverso l'utilizzo di superfici riflettenti; questo principio si applica in particolar modo per le celle solari bifacciali, la cui produzione potrà essere incrementata mediante utilizzo di superfici aventi un fattore di albedo elevato, più o meno distanziate dai moduli (impiego ottimale per pensiline e tettoie).</i>
<b>Requisito</b>	<b>Tenuta all'acqua / Resistenza agli agenti atmosferici</b> Attitudine dell'elemento tecnico ad impedire l'ingresso dell'acqua, anche in presenza di momentanei ristagni dovuti ad accumuli localizzati di grandine o di neve, al fine di garantire il benessere microclimatico degli utenti.
<i>Linea di indirizzo</i>	<i>I BIPV devono assicurare una completa tenuta al passaggio di acqua meteorica, anche in seguito ad accumuli localizzati di neve o grandine, evitando altresì qualsiasi infiltrazione o assorbimento di acqua, in particolare in corrispondenza di giunti verticali o orizzontali.</i>
<b>Esigenza</b>	<b>BENESSERE ACUSTICO</b>
<b>Requisito</b>	<b>Isolamento acustico</b> Attitudine dell'elemento tecnico a fornire un'adeguata resistenza al passaggio dei rumori, al fine di garantire il benessere acustico degli utenti.
<i>Linea di indirizzo</i>	<i>I sistemi BIPV deputati alla separazione tra ambienti interni abitabili e spazi esterni (es. facciate continue, coperture vetrate) dovranno essere progettati e realizzati in modo da controllare e ridurre adeguatamente la trasmissione di rumori aerei.</i>
<b>Esigenza</b>	<b>BENESSERE VISIVO E LUMINOSO</b>
<b>Requisito</b>	<b>Controllo del flusso luminoso / controllo della luce naturale</b> Attitudine dell'elemento tecnico a regolare l'ingresso di energia luminosa in funzione delle specifiche esigenze progettuali, al fine di garantire il benessere visivo degli utenti.
<i>Linea di indirizzo</i>	<i>I moduli BIPV semi-trasparenti (es. facciate continue, serramenti) e le schermature solari BIPV (es. frangisole, pensiline) devono consentire un completo controllo dell'illuminazione naturale, dalla sua captazione alla possibile esclusione parziale o totale, con possibilità di regolazione in funzione delle condizioni esterne, al fine di garantire agli utenti le condizioni di benessere visivo e luminoso.</i>
<b>Esigenza</b>	<b>SICUREZZA NELL'IMPIEGO</b>
<b>Requisito</b>	<b>Protezione dalle cadute</b> Attitudine dell'elemento tecnico a consentire un'adeguata protezione alle cadute.
<i>Linea di indirizzo</i>	<i>I BIPV rispondenti a tale requisito (in particolare i parapetti) devono essere progettati e realizzati in modo tale da consentire un'adeguata protezione alle cadute in funzione alle proprie caratteristiche di: altezza, eventuali forature e di resistenza al carico d'esercizio, al fine di garantire la sicurezza e l'incolumità degli utenti.</i>

L'elenco completo dei prodotti, dei casi di successo e delle buone pratiche è riportato nel paragrafo 3.5, mentre i Cataloghi sono consultabili in Appendice.

### 3.4.1 Descrizione dei contenuti delle schede prodotto

Le schede sono articolate in sezioni informative uniformi per tutte le tipologie di prodotti, per consentire una facile lettura comparata della relativa offerta prestazionale, ad eccezione di alcuni blocchi informativi, adattati in funzione delle categorie commerciali analizzate.

#### 1. Info BIPV

La prima sezione informativa è finalizzata alla descrizione degli aspetti generali che definiscono e caratterizzano il prodotto in analisi, inquadrando sinteticamente le principali caratteristiche del modulo BIPV, oggetto di approfondimento successivo; viene operata una distinzione tra modulo *standard*, fornito dall'azienda produttrice in una gamma di produzione dalle caratteristiche prestabilite o moderatamente variabili e modulo *custom*, prodotto ad hoc e spesso frutto della collaborazione tra azienda produttrice e progettista, e dunque dalle caratteristiche in parte o in tutto personalizzabili.

Le informazioni di carattere generale comprendono la denominazione commerciale del prodotto e l'anagrafica relativa alle imprese produttrici e rivenditrici del modulo e/o del sistema BIPV con rispettivi loghi identificativi.

#### 2. Applicazioni consigliate

La classificazione delle possibili applicazioni dei sistemi BIPV parte dalla scomposizione del sistema tecnologico, identificando le unità tecnologiche e classi di elementi tecnici in cui si osserva l'integrazione di uno strato funzionale destinato alla produzione di energia elettrica (Tabella 3).

#### 3. Caratteristiche del prodotto

La terza sezione, strutturata in cinque sottosezioni, descrive in maniera approfondita le principali caratteristiche tecnologiche, morfologiche ed energetiche del prodotto BIPV mediante una serie di parametri utili ad agevolare una lettura comparata tra diverse opzioni.

#### 3.a Composizione dei moduli BIPV

Si riportano nella presente sottosezione informazioni riguardanti la stratigrafia dei moduli con indicazione dei rispettivi materiali e colori [88].

*Strato anteriore (front cover)*: composto da uno o più strati trasparenti che costituiscono la superficie captante del modulo, svolge almeno tre funzioni: trasparenza per la luce in entrata, protezione strutturale delle celle fotovoltaiche e dei circuiti incapsulati e barriera per l'ingresso di umidità e ossigeno. Può essere costituito da diversi materiali:

- *Vetro anteriore (front glass)* - generalmente vetro temprato di sicurezza<sup>28</sup>, extra-chiaro, a basso contenuto di ferro, a cui possono essere aggiunti rivestimenti superficiali funzionali per aumentare l'assorbimento della luce (rivestimenti antiriflesso) e/o per ridurre l'accumulo di sporco (rivestimenti antispurco) o per colorare il modulo BIPV (film, rivestimenti acidati/goffrati o stampe serigrafate).
- *Front sheet* - strati polimerici (polimeri fluorurati, ad es. pellicole ETFE o FEP) per moduli BIPV leggeri e/o flessibili.

---

<sup>28</sup> Si definiscono vetri di sicurezza le tipologie di vetro le cui caratteristiche di rottura sono state modificate attraverso processi di lavorazione che conferiscono "modalità di rottura sicura", ossia, secondo le normative vigenti, se in caso di rottura della lastra è ridotto al minimo il rischio di danni a persone o cose. Sulla base del comportamento alla rottura si distinguono due tipi di vetri.

*Vetro temprato di sicurezza* (UNI EN 12150-1): sottoposto a processo di tempra termica, che ne aumenta le caratteristiche di resistenza a flessione e ne caratterizza la modalità di rottura in numerosi frammenti con bordi smussati e non taglienti.

*Vetro stratificato di sicurezza* (UNI EN 12543): anche detto laminato (dall'inglese *laminated glass*), composto da almeno due lastre, tenute solidali da uno o più fogli di materiale plastico, generalmente PVB (polivinilbutirale). Variando il numero delle lastre e degli strati di materiale plastico, il vetro stratificato consente di ottenere prodotti diversi in grado di coprire una vasta gamma di livelli di sicurezza e protezione. In caso di rottura, l'intercalare trattiene i frammenti di vetro, limita le dimensioni dell'apertura e offre resistenza residua, riducendo il rischio di ferite da taglio e perforazione.

*Strato posteriore (back cover)*: composto da uno o più strati che costituiscono il retro del modulo, svolge le seguenti funzioni: protezione dai fattori di stress ambientali, isolamento elettrico totale del modulo fotovoltaico e dei circuiti incapsulati sovrastanti, resistenza meccanica. Può essere costituito da diversi materiali:

- *vetro posteriore (back glass)* - lastre di vetro float o temprato;
- *back cover* - pannelli in diversi materiali da costruzione (metallici, compositi, ecc.);
- *backsheet multistrato* - materiali polimerici composti da diversi strati; alcuni esempi: polietilene tereftalato (PET), che presenta un'elevata resistenza meccanica e resistività elettrica, utilizzato come nucleo interno nella maggior parte dei *backsheet*; fluoropolimeri come il fluoruro di polivinile (PVF/Tedlar) o polivinilidenefluoruro (PVDF), ad alta stabilità agli agenti atmosferici, utilizzati per lo strato più esterno dei *backsheet*; polietilene a bassa densità (LDPE) o etilene vinil acetato (EVA), che presentano una buona adesione allo strato incapsulante, utilizzati per lo strato più interno dei *backsheet*; poliammide (PA): alternativa per lo strato esterno/interno (laminato su un nucleo in PET); polipropilene (PP).

*Strato incapsulante (encapsulant)*: strato a contatto con entrambi i lati delle celle fotovoltaiche, svolge le seguenti funzioni: protezione delle celle e della circuiteria da fattori ambientali (acqua, umidità, vento, neve, ecc.) e da eventuali danni di natura chimica e meccanica, elevata trasparenza alle lunghezze d'onda della radiazione solare ai fini della produzione energetica, adesione tra gli strati del laminato. Può essere costituito da diversi materiali; si riportano di seguito i più comuni:

- etilene vinil acetato (EVA): copolimero di unità di etilene e acetato di vinile, materiale utilizzato prevalentemente nei moduli standard per i suoi costi più bassi;
- polivinilbutirrale (PVB): resina termoplastica utilizzata principalmente per applicazioni che richiedono legami forti, tenacità e flessibilità, in particolare in moduli BIPV vetro-vetro;
- siliconi (sistemi polimerizzanti e non polimerizzanti): chimicamente inerti, presentano un'ottima affidabilità;
- altri materiali di incapsulamento: elastomeri poliolefinici (POE), elastomeri termoplastici (TPO), ionomeri (dalla elevata resistenza al passaggio del vapore, spesso utilizzati per la protezione di film sottili sensibili all'umidità).

### 3.b Cella solare (PV cell) e tecnologia fotovoltaica impiegata

Unità elementare fotovoltaica di un modulo BIPV, costituita dal materiale fotovoltaico semi-conduttore, una griglia costituita da finger e busbar (o TCO) e rivestimento antiriflesso; viene indicata la tipologia di tecnologia fotovoltaica<sup>29</sup>, classificata in base al materiale semiconduttore:

- celle in silicio cristallino (c-Si): monocristallino (mono-Si), policristallino (multi-Si), PERC Passivated Emitter and Rear Contact (Si-PERC), di tipo tradizionale, back contact, bifacciale, ecc.;
- film sottile di 2a generazione: silicio amorfo (a-Si), tellururo di cadmio (CdTe), (di)seleniuro di rame indio gallio (CIGS);
- film sottile di 3a generazione: celle di Grätzel o dye-sensitized solar cell (DSSC), fotovoltaico organico (OPV);
- eterogiunzioni (HJT): tecnologie ibride derivanti dalla combinazione di diverse tecnologie fotovoltaiche, per raggiungere livelli più elevati di efficienza.

<sup>29</sup> Le tecnologie fotovoltaiche sono generalmente classificate in tre generazioni, a seconda del materiale di base utilizzato e del livello di maturità raggiunto: la 1a generazione, il silicio cristallino, domina il mercato FV grazie alla sua elevata efficienza, la 2a generazione, il film sottile, è la categoria che presenta costi inferiori per Wp, mentre la 3a generazione comprende le tecnologie emergenti e innovative; pur essendo la perovskite un semiconduttore di ultima generazione, dalle prestazioni assai promettenti, non sarà riportata nelle schede, poiché prodotti BIPV con tale tecnologia non sono ancora disponibili sul mercato [92].

### 3.c Dati dimensionali e dati energetici

Nella seconda sottosezione si riportano i dati dimensionali del modulo analizzato riferiti alla sua gamma di produzione standard (forma, dimensioni, peso); per alcuni prodotti personalizzabili (*custom*) sono riportati dati riferibili ad un modulo generico, presentato a titolo esemplificativo. Per ciascuno dei moduli individuati, si riportano nella terza sottosezione i principali dati energetici, ossia la classe di potenza nominale ( $W_p$ ), la potenza specifica ( $W_p/m^2$ ), la corrente di cortocircuito  $I_{sc}$  (A), la corrente alla massima potenza  $I_{mp}$  (A), la tensione a circuito aperto  $V_{oc}$  (V) e la tensione alla massima potenza  $V_{mp}$  (V).<sup>30</sup>

### 3.d Caratteristiche tecnologiche e morfologiche

La terza sottosezione fornisce una classificazione in base ad una serie di parametri tecnologici e morfologici, riferiti alle proprietà e caratteristiche dei moduli BIPV impiegati per ciascun caso studio [88].

*Trasparenza*: capacità di un corpo di permettere il passaggio, attraverso il suo spessore, di radiazioni luminose, e quindi la visione di oggetti situati al di là di esso. L'innovazione tecnologica in campo fotovoltaico consente oggi la possibilità di ottenere diversi gradi di trasparenza, con conseguenti vantaggi nella progettazione degli involucri vetrati. I moduli più diffusi sul mercato sono, nell'ordine, quelli opachi, semi-trasparenti, traslucidi.

- *Modulo opaco*: non trasmette luce visibile, gli oggetti non sono visibili attraverso di esso.
- *Modulo trasparente*: trasmette luce visibile senza dispersione apprezzabile, in modo che gli oggetti siano distintamente visibili attraverso di esso.
- *Modulo semi-trasparente*: trasmette luce visibile senza dispersione apprezzabile ma con parziale ostruzione visiva dovuta all'utilizzo di celle solari opache.
- *Modulo traslucido*: trasmette la luce visibile principalmente per trasmissione diffusa, in modo che gli oggetti non siano distintamente visibili attraverso di esso.
- *Modulo semi-traslucido*: trasmette la luce visibile in gran parte per trasmissione diffusa ma con parziale ostruzione visiva dovuta all'uso di celle solari opache.

*Planarità*: proprietà caratteristica delle superfici piane. I moduli curvi sono ottenuti da un processo di customizzazione, progettati e realizzati caso per caso.

- *Modulo piano*: può essere rappresentato da una singola superficie planare.
- *Modulo curvo*: non può essere rappresentato da una singola superficie planare.

*Rigidità meccanica*: capacità del modulo di piegarsi senza alterare le sue proprietà meccaniche.

- *Modulo flessibile*: è in grado di piegarsi per adattarsi a una superficie curva, ma può anche essere montato su una superficie piana; si considera flessibile un modulo avente raggio di curvatura minore o uguale a 500 mm, in almeno una direzione.
- *Modulo rigido*: non è flessibile.

*Isolamento termico*: attitudine dell'elemento BIPV ad assicurare un'opportuna resistenza al passaggio di calore in funzione delle condizioni climatiche, nel caso sia incluso in parti dell'involucro deputate al controllo degli aspetti termo-igrometrici.

- *Modulo isolato*: la trasmittanza termica è uguale o inferiore ai valori normativi di riferimento per l'involucro; generalmente è un modulo rigido vetrocamera, composto da due strati di vetro, di cui il più esterno con materiale fotovoltaico interposto, ed una camera d'aria.
- *Modulo non isolato*: modulo la cui trasmittanza termica è superiore ai valori normativi di riferimento per l'involucro; può essere rigido o flessibile, nella configurazione vetro-vetro (stratificato) o vetro-backsheet.

*Forma*: quantità e tipi di formati utilizzati nel progetto (rettangolare, quadrata, ecc.).

*Dimensioni*: caratteristiche dimensionali (altezza, larghezza spessore) esplicitate per ciascun formato.

---

<sup>30</sup>  $I_{sc}$ : corrente massima prodotta da un dispositivo in determinate condizioni di luce e temperatura);  $I_{mp}$ : corrente massima nominale di un dispositivo in determinate condizioni di luce e temperatura;  $V_{oc}$ : tensione massima di un dispositivo in determinate condizioni di luce e temperatura, corrispondente alla massima tensione potenziale;  $V_{mp}$ : tensione che si traduce in potenza massima in determinate condizioni di luce e temperatura.

*Colori*: caratteristiche cromatiche esplicitate per ciascuno strato componente il modulo fotovoltaico (*front-cover*, *incapsulante*, *celle*, *back-cover*), ad esclusione dei materiali privi di pigmentazione.

*Finitura*: caratteristiche morfologiche dello strato superficiale del modulo fotovoltaico, con esplicitazione del grado di brillantezza, ossia dell'intensità della luce riflessa (lucida, satinata, matta, strutturata) e della eventuale texture.

*Pattern*: disposizione schematica delle celle fotovoltaiche nel modulo, qualora queste siano a vista (regolare, griglia, random, strisce, ecc).

### 3.e Requisiti tecnologici connotanti

A completamento della sezione riferita alle caratteristiche del prodotto, si riportano i principali requisiti tecnologici connotanti il sistema o componente analizzato (Tabella 4).

### 4. Indicatori di integrabilità architettonica

La presente sezione ha come obiettivo fornire indicazioni circa la potenziale integrabilità architettonica del prodotto analizzato, mediante la rispondenza al set di indicatori sintetici di tipo qualitativo precedentemente individuati (cfr. paragrafo 3.3). Per ciascun prodotto saranno riportati solo gli indicatori per cui la verifica di soddisfacimento abbia dato esito positivo, seguiti da una breve descrizione delle prestazioni offerte. Si riporta di seguito l'elenco completo degli indicatori, relazionati ai corrispettivi criteri di integrabilità architettonica (Tabella 5).

**Tabella 5 - Criteri e indicatori di integrabilità architettonica.**

<b>Criteri di integrabilità architettonica</b>	<b>Indicatori di integrabilità architettonica</b>
1. Coerenza geometrica	1.1 <i>Personalizzazione geometrica</i> 1.2 <i>Disponibilità di dummies</i>
2. Coerenza morfologica	2.1a <i>Personalizzazione del pattern</i> 2.1b <i>Non percepibilità del sistema fotovoltaico</i> 2.2 <i>Personalizzazione della finitura</i> 2.3 <i>Possibilità di installazione senza cornice</i>
3. Coerenza cromatica	3.1 <i>Personalizzazione cromatica</i>
4. Coerenza dell'installazione	4.1 <i>Flessibilità di installazione</i>

### 5. Esempi di applicazioni

Sezione dedicata alle applicazioni progettuali esemplificative dei prodotti schedati, con immagini desunte perlopiù dal materiale tecnico-informativo disponibile sui siti-web delle aziende.

Il *catalogo di prodotti BIPV* è riportato in Appendice 1. A titolo esemplificativo si riporta di seguito una scheda prodotto.

**BIPV.03**

**Modulo-tegola opaco**

vetro-vetro

**Info BIPV**

Fonte dati, grafici e immagini: [www.sunage.ch](http://www.sunage.ch)

*Denominazione e descrizione*

Modulo-tegola BIPV standard/custom opaco **Suncol Tile M3** in vetro stratificato di sicurezza 3,2+3,2 mm, con vetro anteriore solare temprato trasparente o dal colore / texture personalizzabile *Suncol*, finitura satinata antiriflesso, vetro posteriore nero, celle in silicio monocristallino ad alta efficienza di colore nero (158,75x158,75 mm).

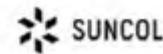


*Azienda produttrice*

**Sunage SA**



Corso San Gottardo 54B, 6830 Chiasso, CH  
+41 916468933 - [www.sunage.ch](http://www.sunage.ch) - [marketing@sunage.ch](mailto:marketing@sunage.ch)



**Applicazioni consigliate**

**Copertura**

- C1 copertura discontinua (pendenza >15°)
- C2 copertura continua
- C3 copertura vetrata/lucernario

**Facciata**

- F1 facciata continua
- F2 facciata ventilata
- F3 facciata a doppia pelle
- F4 serramento

**Dispositivi esterni integrati**

- D1 parapetto/coronamento
- D2 frangisole fisso/mobile
- D3 pensilina/tettoia/pergola (pendenza >15°)

**Caratteristiche del prodotto**

**Stratigrafia**

<i>Front cover</i>	vetro temprato	trasparente/custom
<i>Incapsulante</i>	EVA Solar	trasparente
<i>Celle solari</i>	c-Si	nero
<i>Back cover</i>	vetro float	nero

**Dati dimensionali standard**

<i>Forma</i>	rettangolare
<i>Dimensioni</i>	
▪ 32 celle	1.350 x 800 x 8 mm (32 celle)
▪ 16-V celle	673,5 x 800 x 8 mm (16 celle)
▪ 16-H celle	1.350 x 440 x 8 mm (16 celle)
▪ 8 celle	673,5 x 440 x 8 mm (8 celle)
<i>Peso</i>	
▪ 32 celle	21,0 kg (19,4 kg/m <sup>2</sup> )
▪ 16-V celle	10,5 kg (19,4 kg/m <sup>2</sup> )
▪ 16-H celle	11,5 kg (19,4 kg/m <sup>2</sup> )
▪ 8 celle	6,0 kg (19,4 kg/m <sup>2</sup> )

**Caratteristiche tecnologiche e morfologiche**

<i>Trasparenza</i>	opaco
<i>Finitura</i>	satinata antiriflesso
<i>Pattern</i>	assente, celle invisibili / custom
<i>Planarità</i>	piano
<i>Rigidità</i>	rigido
<i>Isolamento</i>	non isolato

**Tecnologia FV**

- mono-Si
- multi-Si
- PERC, BIF, BC
- FS (a-Si)
- FS (CdTe)
- FS (CGS)
- FS (DSSC)
- FS (DIPV)
- HIT

**Dati energetici**

colorato		trasparente		colorato		trasparente	
Potenza max		Potenza max		Potenza specifica		Potenza specifica	
150 Wp	160 Wp	139 Wp/m <sup>2</sup>	148 Wp/m <sup>2</sup>	139 Wp/m <sup>2</sup>	148 Wp/m <sup>2</sup>	135 Wp/m <sup>2</sup>	148 Wp/m <sup>2</sup>
75 Wp	80 Wp	139 Wp/m <sup>2</sup>	148 Wp/m <sup>2</sup>	127 Wp/m <sup>2</sup>	135 Wp/m <sup>2</sup>	135 Wp/m <sup>2</sup>	135 Wp/m <sup>2</sup>
37,5 Wp	40 Wp	127 Wp/m <sup>2</sup>	135 Wp/m <sup>2</sup>	127 Wp/m <sup>2</sup>	135 Wp/m <sup>2</sup>	127 Wp/m <sup>2</sup>	135 Wp/m <sup>2</sup>
<i>I<sub>sc</sub></i>	<i>I<sub>mp</sub></i>	<i>I<sub>sc</sub></i>	<i>I<sub>mp</sub></i>	<i>V<sub>oc</sub></i>	<i>V<sub>mp</sub></i>	<i>V<sub>oc</sub></i>	<i>V<sub>mp</sub></i>
9,3	8,9 A	9,5	9,2 A	21,2	17,0 V	21,3	17,4 V
9,3	8,9 A	9,5	9,2 A	10,6	8,5 V	10,7	8,7 V
9,3	8,9 A	9,5	9,2 A	10,6	8,5 V	10,7	8,7 V
9,3	8,9 A	9,5	9,2 A	5,3	4,3 V	5,3	4,4 V

**Requisiti tecnologici connotanti**

- resistenza meccanica ai carichi
- ventilazione naturale
- tenuta all'acqua
- resistenza agli agenti atmosferici
- controllo del fattore solare

**Indicatori di integrabilità architettonica**

- *Personalizzazione geometrica*: disponibilità di 4 formati standard, con possibilità di realizzare moduli su misura.
- *Disponibilità di dummies*.
- *Personalizzazione finitura*: possibilità di riprodurre texture sulla faccia interna del vetro anteriore per simulare coppi/tegole di tipo tradizionale.
- *Non percepibilità del sistema fotovoltaico*: le celle non risultano visibili, grazie alla colorazione o alla serigrafia (texture) del vetro anteriore.
- *Possibilità di installazione senza cornice*.
- *Personalizzazione cromatica*: il vetro anteriore è disponibile in diverse colorazioni.
- *Flessibilità di installazione*: possibilità di impiegare i moduli in diverse posizioni/parti dell'edificio.

SUNCOL-TILE 32

SUNCOL-TILE 16-V

SUNCOL-TILE 16-H

SUNCOL-TILE 8

Brown glass color swatch

Dark brown glass color swatch

Front glass texture swatch

Coppo roof texture swatch

Terra roof texture swatch

Cotto roof texture swatch

Cotto roof texture swatch

Cotto roof texture swatch

Cotto roof texture swatch

Gamma di colori e texture disponibili a catalogo

**Esempi di applicazioni**

Esempio di applicazione (front glass marrone)

Seergraben (CH) - front glass terracotta

Varen (CH) - front glass trasparente, back glass nero

### 3.4.2 Descrizione dei contenuti delle schede relative alle “buone pratiche”

Le schede analitiche relative alle buone pratiche sono articolate in sezioni informative uniformi, per consentire una facile lettura comparata e dedurre la corrispondenza tra obiettivi di progetto e risultati raggiunti nei diversi interventi. Ciascuna scheda è identificata con un codice alfanumerico riferito all’oggetto della schedatura (CS) la collocazione geografica (IT/EU) ed il numero progressivo (da 1 a 15). Si riportano in alto a destra, ove consultati, i database di riferimento per i dati, i grafici e le immagini riportati nelle schede.

#### 1. Dati progetto

Al primo blocco informativo appartengono i dati relativi al manufatto architettonico, ossia la localizzazione (con la posizione geografica fornita dalle coordinate di *latitudine* e *longitudine*), la destinazione d’uso, i progettisti, l’anno di completamento dell’intervento, la scala d’intervento (*edificio/complesso urbano/spazio aperto*) e il tipo d’intervento (*ex novo/retrofit tecnologico*, quest’ultimo a sua volta distinto nelle sottocategorie di *addizione, recladding e sostituzione*).

In relazione alla destinazione d’uso dell’edificio, si individuano quattro macro-gruppi ricorrenti:

- residenziale unifamiliare (SFH - *Single Family Housing*), plurifamiliare (MFH - *Multi Family Housing*), turistico-ricettivo (identificato nelle schede progetto con il colore blu ■);
- direzionale (identificato nelle schede progetto con il colore verde ■);
- culturale, ricreativo, religioso, istruzione, sanitario (identificato nelle schede progetto con il colore marrone ■);
- commerciale, produttivo (agricolo/industriale), trasporti, sportivo, altro (identificato nelle schede progetto con il colore viola ■).

#### 2. Dati BIPV

La seconda sezione informativa è volta ad inquadrare sinteticamente le principali caratteristiche del sistema BIPV impiegato nel progetto, che sarà poi oggetto di approfondimento nelle sezioni successive; sono dunque esplicitate la categoria di applicazione secondo lo standard di riferimento IEC 63092-1:2020 (Tabella 1), la denominazione commerciale e descrizione del modulo BIPV, l’anagrafica dell’azienda produttrice del modulo e/o del sistema BIPV.

#### 3. Aspetti ambientali e tipo-morfologici relativi all’edificio e al contesto

Al fine di valutare il potenziale di producibilità energetica di un dato sistema BIPV, è necessario identificare correttamente le caratteristiche del contesto in cui si inserisce l’intervento. Ciò si traduce nell’individuazione di un insieme di parametri descrittivi delle caratteristiche ambientali e tipo-morfologiche del contesto di intervento, che consentono di orientare il processo decisionale verso le soluzioni più efficaci e appropriate<sup>31</sup>.

- *Radiazione solare globale annua sul piano orizzontale*, espressa in kWh/m<sup>2</sup>.
- *Orientamento*: N-S (nord-sud), NE-SO (nordest-sudovest), NO-SE (nordovest-sudest), EO (est-ovest).
- *Tipo di tessuto urbano*: contesto extra-urbano (rurale, periferico o industriale), contesto direzionale, contesto urbano moderno, contesto urbano storico, ecc.
- *Morfologia dell’edificio*: copertura piana, inclinata, curva; facciate dalla forma compatta senza sporti né aggetti, presenza di logge o rientranze, presenza di sporti o balconi, ecc.

#### 4. Descrizione del Sistema BIPV

La sezione in oggetto descrive in maniera approfondita le principali caratteristiche tecnologiche, morfologiche ed energetiche del sistema BIPV impiegato mediante una serie di parametri utili ad agevolare una lettura comparata tra diverse opzioni.

Si fa qui riferimento alla distinzione operata nell’ambito dell’IEA-PVPS Task 15 tra “modulo (o prodotto) BIPV” e “sistema BIPV” [17], intendendo per modulo la più piccola, indivisibile, unità fotovoltaica che conserva la funzionalità correlata all’edificio, e per sistema BIPV il sistema composto dai moduli BIPV che soddisfano la definizione di cui sopra, i componenti elettrici necessari per collegare i moduli BIPV ai circuiti esterni e i sistemi di montaggio meccanico necessari per l’integrazione dei moduli BIPV nell’edificio.

<sup>31</sup> Per approfondimenti si rimanda al capitolo 2, paragrafo 2.4.

#### 4.1 Unità tecnologiche e classi di elementi tecnici

La classificazione dei sistemi BIPV parte dalla scomposizione del sistema tecnologico, identificando i sistemi BIPV a partire dall'unità tecnologica (UT) e dalle classi di elementi tecnici (CET) in cui si osserva l'integrazione di uno strato funzionale destinato alla produzione di energia elettrica (Tabella 3).

#### 4.2 Caratteristiche tecnologiche e morfologiche del modulo BIPV

In analogia con quanto riportato nella sezione riferita alle caratteristiche dei moduli BIPV nella struttura delle schede-prodotto, la presente sezione fornisce una serie di informazioni riguardanti proprietà e caratteristiche dei moduli BIPV impiegati per ciascun caso studio, ossia produzione (standard/custom), trasparenza, planarità, rigidità meccanica, isolamento termico, presenza/assenza di cornice, presenza/assenza di moduli *dummies*, forma, dimensioni, colori, finitura, pattern (cfr. paragrafo 3.4.1).

#### 4.3 Requisiti tecnologici connotanti il sistema BIPV

Si riportano in questa sezione i requisiti tecnologici connotanti il sistema BIPV (Tabella 4).

#### 4.4 Dati energetici

La capacità di generazione energetica di un sistema fotovoltaico dipende da diversi fattori: tra questi la disponibilità di radiazione solare presso il sito di realizzazione dell'impianto, il posizionamento dei moduli BIPV (descritto dagli angoli di *tilt* e *azimut*), l'efficienza di conversione della tecnologia adoperata e la dimensione dell'impianto installato in termini di potenza nominale e produzione energetica annua. Si riportano in questa sezione alcuni dei parametri summenzionati.

- *Tecnologia fotovoltaica*: classificata in base al materiale semiconduttore (cfr. paragrafo 3.4.1).
- *Orientamento (azimut) dei moduli*: angolo tra la normale ai moduli fotovoltaici e il sud geografico (cfr. paragrafo 2.4).
- *Inclinazione (tilt) dei moduli*: angolo formato tra il piano orizzontale e il piano di giacitura dei moduli fotovoltaici (cfr. paragrafo 2.4).
- *Potenza nominale dell'impianto (kWp)*: dimensione dell'impianto fotovoltaico in termini di potenza nominale istantanea (massima teorica) che può essere prodotta dal sistema sottoposto a condizioni ottimali standard (STC, irraggiamento solare  $1.000 \text{ W/m}^2$ , Temperatura  $25^\circ\text{C}$ ). La potenza dipende dalle caratteristiche intrinseche del modulo (tecnologia fotovoltaica) e dalle dimensioni dell'impianto, mentre è indipendente dalle condizioni di installazione (posizione geografica, clima, azimut, tilt, ecc.). Per ottenere la potenza di picco di un impianto fotovoltaico bisogna sommare tutte le singole potenze di picco di ciascun modulo che compone l'impianto.
- *Produzione energetica annua ( $\text{kWh/m}^2$ )*: quantità di energia elettrica che può essere prodotta dall'impianto fotovoltaico nell'arco di un anno, calcolata per ognuno dei suoi kWp di potenza (1 kWh indica l'energia fornita in 1 ora dalla potenza di un Watt). L'energia prodotta dipende (oltre che dalle caratteristiche del modulo e del sistema) dalla posizione geografica e dalle condizioni di installazione<sup>32</sup>.
- *Copertura del fabbisogno energetico*: percentuale del fabbisogno energetico annuo per usi elettrici coperto dalla produzione di energia elettrica tramite impianto fotovoltaico.

#### 5. Target raggiunti e fattori di successo

Al fine di valutare correttamente il grado di integrazione architettonica raggiunto, sono stati individuati alcuni parametri volti alla comprensione dell'efficacia prestazionale e della potenziale replicabilità delle soluzioni adottate; tali parametri sono stati espressi in termini qualitativi, non assegnando uno specifico punteggio alle diverse soluzioni ma tentando di correlare la qualità architettonica del progetto e dei risultati conseguiti con le peculiarità delle soluzioni progettuali adottate.

I risultati sono dunque esprimibili in termini di target raggiunti e di fattori di successo per ciascun caso studio, rilevando i seguenti aspetti:

---

<sup>32</sup> Ad esempio, in Italia la produzione di energia FV può variare da 900-1.000 a 1.500 kWh/kWp all'anno; un impianto di 3 kWp di potenza produrrà in un anno circa 3.000 kWh al nord e 4.500 kWh al sud.

- *Criteri di integrabilità architettonica:* riferiti alle modalità di integrazione del sistema BIPV nel manufatto architettonico e alla capacità di fornire risposte coerenti e adeguate rispetto a esigenze e obiettivi progettuali differenziati caso per caso.
- *Riduzione del fabbisogno energetico e degli impatti ambientali:* riferiti alle possibili ricadute in termini di riduzione del fabbisogno energetico e delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivante dall'integrazione del sistema BIPV nonché dall'impiego di soluzioni progettuali efficaci dal punto di vista energetico-ambientale e potenzialmente replicabili in contesti edilizi e urbani analoghi a quello in cui sono state realizzate.
- *Impatto e comunicabilità dei risultati conseguiti:* riferiti alla percezione del valore aggiunto in termini di premi e riconoscimenti, impatti positivi tangibili e trasferibili su larga scala, messaggi programmatici di sostenibilità e responsabilità ambientale da parte degli stakeholder partecipanti al processo progettuale.

6. Immagini e grafici di dettaglio

Completa ciascuna scheda una sezione dedicata ai grafici di dettaglio e alle immagini più significative ed esemplificative dei sistemi installati, utili alla comprensione del funzionamento del sistema BIPV e della sua integrazione nel manufatto architettonico.

I cataloghi di casi studio sono riportati in Appendice 2 (Catalogo di "Casi di successo" BIPV) e Appendice 3 (Catalogo di "Buone pratiche" BIPV). A titolo esemplificativo si riportano di seguito un esempio di scheda sintetica (caso di successo) e scheda analitica (buona pratica) riferite al contesto italiano.

**D1 Riqualficazione condominiale a Milano**

**Dati progetto**

Destinazione d'uso	Residenziale - MFH
Localizzazione	Milano
Progettista	Solmonte S.r.l.
Anno	2020
Scala e tipo intervento	Edificio - retrofit tecnologico (sostituzione)
Fonte dati e immagini	GruppoSTG

**Retrofit**

---

**Dati BIPV**

**Parapetti** orientati a sud, realizzati con moduli standard/custom semi-trasparenti in vetro stratificato di sicurezza *Balcone Fotovoltaico EnergyGlass* (10+10 mm), con celle in silicio monocristallino di colore nero bifacciali, installati con sistema *Faraone mod. Ninfa FV*, con cablaggi occultati nei profili [15 kWp].

**Copertura BAPV** [4 kWp].









<b>CS.IT.08 Edificio residenziale in Via Brisa, Milano</b>		<b>Retrofit</b>
<b>Dati progetto</b> <i>Fonte: GDieni Architetti</i>		
<b>Localizzazione</b>	Via Brisa 7, 20123 Milano Coordinate: 45°27'54.20"N, 9°10'49.20"E / Altitudine: 120 m s.l.m.	
<b>Destinazione d'uso</b>	■ Residenziale - MFH	
<b>Progettisti</b>	GDieni Architetti - <a href="http://www.dieniarchitetti.com">www.dieniarchitetti.com</a>	
<b>Anno</b>	2010	
<b>Scala intervento</b>	<input checked="" type="checkbox"/> edificio <input type="checkbox"/> complesso urbano <input type="checkbox"/> spazio aperto	
<b>Tipo intervento</b>	<input type="checkbox"/> ex novo <input checked="" type="checkbox"/> retrofit: <input type="checkbox"/> addizione <input checked="" type="checkbox"/> recladding <input type="checkbox"/> sostituzione	
<b>Dati BIPV</b> <b>F2. Facciata ventilata - moduli opachi</b>		
<b>Categoria di applicazione</b>	Integrato nella facciata, non accessibile dall'interno	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> E
<b>Denominazione e descrizione modulo</b>	Moduli custom opachi IS-170 con vetro anteriore temprato microstrutturato, celle in mono-Si di colore nero su back-sheet bianco, montati con sistema a scomparsa	
<b>Azienda produttrice modulo</b>	<b>ISO FOTON</b> Isofotón Italia S.r.l. - Milano, IT ( <i>attività cessata</i> ) Isofotón S.A., Malaga, ES ( <i>attività cessata</i> )	
<b>Azienda produttrice sistema di facciata</b>	<b>DALLERA</b> Tecnologie S.r.l. Dallera Tecnologie S.r.l. - Agrate B.za (MB), IT +39 039 6056490 - <a href="mailto:info@dalleratecnologie.it">info@dalleratecnologie.it</a> <a href="http://www.dalleratecnologie.it">www.dalleratecnologie.it</a>	
<b>Aspetti ambientali e tipo-morfologici relativi all'edificio e al contesto</b>		
<b>Radiazione globale annua sul piano orizzontale</b>	1.404 kWh/m <sup>2</sup>	
<b>Orientamento</b>	N-S	
<b>Tipo di tessuto urbano</b>	contesto urbano storico	
<b>Morfologia edificio</b>	copertura piana, forma compatta	

CS.IT.08		Edificio residenziale in Via Brisa, Milano		Retrofit
<b>Descrizione del Sistema BIPV</b>				
<b>Unità tecnologica: Facciata</b>		<b>Caratteristiche tecnologiche e morfologiche del modulo BIPV</b>		
<input type="checkbox"/> F1 facciata continua <input checked="" type="checkbox"/> F2 facciata ventilata <input type="checkbox"/> F3 facciata a doppia cella <input type="checkbox"/> F4 (arrangiata)		Produzione: <input type="checkbox"/> standard <input checked="" type="checkbox"/> custom Trasparenza: <input type="checkbox"/> semi-trasp. <input type="checkbox"/> trasparente <input checked="" type="checkbox"/> opaco Planarità: <input checked="" type="checkbox"/> piano <input type="checkbox"/> curvo Rigidità: <input checked="" type="checkbox"/> rigida <input type="checkbox"/> flessibile Isolamento: <input type="checkbox"/> isolato <input checked="" type="checkbox"/> non isolato Cornice: <input checked="" type="checkbox"/> presente <input type="checkbox"/> assente Dummies: <input type="checkbox"/> presenti <input checked="" type="checkbox"/> assenti		
		Forma: rettangolare, unico formato Dimensioni: 1.224x1.047x30 mm Colori: celle: nero standard backsheet: bianco Finitura: standard Pattern: griglia regolare, celle ravvicinate a vista		
<b>Requisiti tecnologici connotanti il sistema BIPV</b>				
<input type="checkbox"/> resistenza meccanica in carico <input checked="" type="checkbox"/> ventilazione naturale <input type="checkbox"/> controllo del flusso luminoso <input type="checkbox"/> protezione dalle cadute <input type="checkbox"/> tenuta all'acqua <input checked="" type="checkbox"/> controllo del fattore solare <input type="checkbox"/> isolamento termico scivolo <input checked="" type="checkbox"/> resistenza agli agenti atmosferici <input type="checkbox"/> riciclabilità secondo norme guida per solar				
<b>Dati energetici</b>				
<b>Tecnologia FV</b>		<input checked="" type="checkbox"/> cristallino <input checked="" type="checkbox"/> mono-Si <input type="checkbox"/> multi-Si <input type="checkbox"/> PERC, bifacciale, hetero-junction <input type="checkbox"/> HJT <input type="checkbox"/> film sottile <input type="checkbox"/> a-Si <input type="checkbox"/> C/Te <input type="checkbox"/> CdTe/CdS <input type="checkbox"/> DSSC <input type="checkbox"/> OPV		
Azimut (orientamento)		-5° (S)		
Tilt (inclinazione)		90° (verticale)		
Dimensione sistema fotovoltaico		n.105 moduli (72 celle) 156 m <sup>2</sup>		
Potenza nominale impianto		17,85 kWp		
Produzione energetica annua		n.d.		
Copertura fabbisogno energetico		n.d.		
 Cella in mono-Si 125x125 mm				
<b>Target raggiunti - fattori di successo</b>				
<b>Criteri di integrabilità architettonica</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Coerenza geometrica:</b> l'impiego di moduli custom modulari con celle di colore nero consente una perfetta integrazione cromatica e geometrica nella facciata Sud, in continuità con il rivestimento in tavole di gres porcellanato.</li> <li>• <b>Coerenza dell'installazione:</b> la fascia marcapiano, in lamiera di colore grigio scuro, è l'ideale sede compensativa per raccordare i diversi elementi costruttivi e nascondere i cablaggi.</li> </ul>		
<b>Riduzione del fabbisogno energetico e degli impatti ambientali</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Isolamento a cappotto mediante doppio strato di pannelli isolanti in poliuretano da 50+50 mm, con intercapedine di ventilazione da 40 mm aperta alla base e in sommità tramite apposite griglie microforate.</li> </ul>		
<b>Impatto e comunicabilità dei risultati conseguiti</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esempio virtuoso di riqualificazione sostenibile in area collocata in prossimità di scavi archeologici e dunque sottoposta a vincolo archeologico, che per l'armonizzazione del sistema fotovoltaico nel concept dell'edificio è riuscita ad ottenere parere favorevole da parte della Soprintendenza.</li> </ul>		
<b>Immagini e grafici di dettaglio</b>				
				
Vista delle facciate Sud (a fine lavori) ed Est (in costruzione)				

**CS.IT.08**

**Edificio residenziale in Via Brisa, Milano**

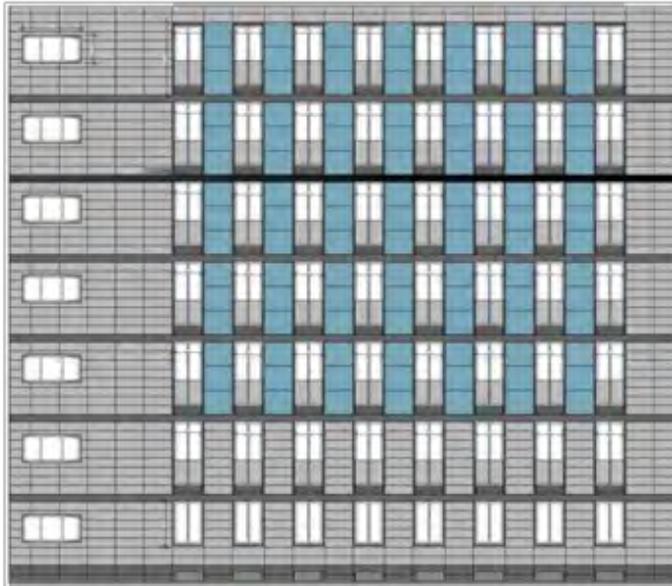
**Retrofit**



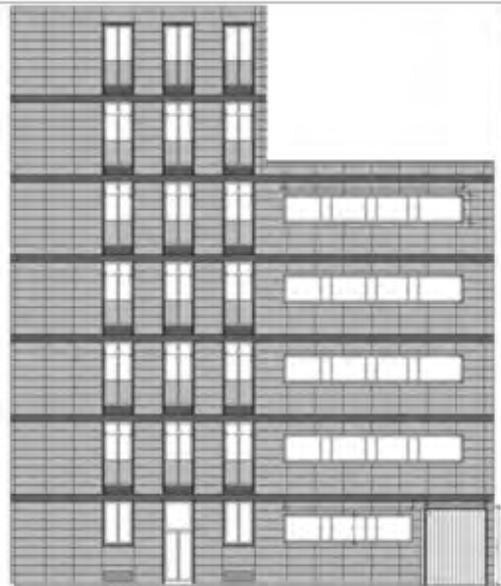
Particolare della facciata Sud, vista dei moduli fotovoltaici



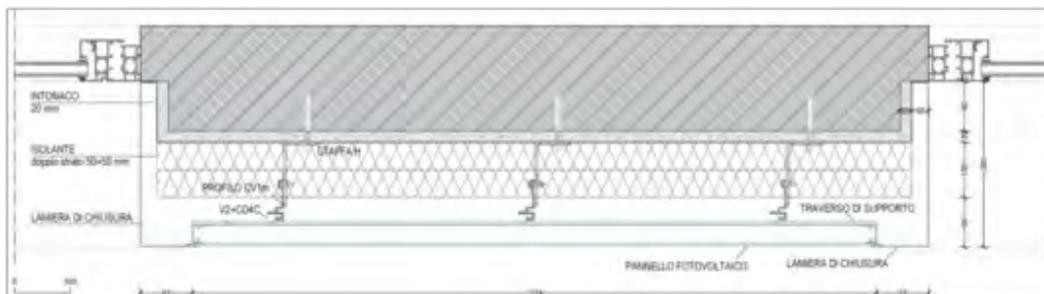
Particolare della facciata Est, vista della facciata ventilata in costruzione, montata con sistema Dalleria Tecnologie, modello "Venere Nascosto"



PROSPETTO FRONTALE, LATO SUD  
facciata ventilata, sistema "VENERE" ■ Moduli fotovoltaici



PROSPETTO LATERALE, LATO EST  
facciata ventilata, sistema "VENERE"



Prospetti Sud (con individuazione dei moduli FV) ed Est; particolare costruttivo della facciata ventilata in corrispondenza dei moduli fotovoltaici.

Fonte grafici e immagini: © GDieni Architetti

### 3.5 Considerazioni sintetiche sulle schedature

Si riportano di seguito alcune considerazioni sintetiche sulle schedature effettuate, con riferimento alle tipologie e caratteristiche di prodotti e progetti analizzati; le considerazioni che ne scaturiscono, in merito alle criticità e potenzialità di applicazione dei BIPV nel contesto normativo e produttivo nazionale, con alcuni possibili obiettivi di innovazione dell'industria BIPV, saranno affrontate in maniera approfondita nel paragrafo 3.6.

#### Considerazioni sul catalogo di prodotti BIPV

In relazione al catalogo di prodotti BIPV, si è ritenuto significativo, ai fini della presente ricerca, indagare un campione di n.30 sistemi e componenti. Il campione d'indagine fornisce una panoramica abbastanza variegata delle possibili opzioni tecnologiche attualmente presenti sul mercato BIPV in Italia, fornite da produttori italiani e esteri, includendo tutte le diverse tipologie di integrazione nell'involucro edilizio.

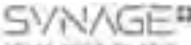
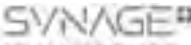
I criteri di selezione dei prodotti si basano sulla disponibilità nel nostro paese in termini di produzione e/o commercializzazione, sulla reperibilità di informazioni tecnico-commerciali riguardanti le prestazioni offerte, compresi manuali di installazione e dettagli costruttivi, sull'impiego di tecnologie *market ready* e sulla presentazione, da parte del sito web aziendale o dell'ufficio tecnico-commerciale, di esempi realizzati e/o casi applicativi con chiari riferimenti agli esiti progettuali delle integrazioni.

Le tabelle e i grafici di seguito riportati mostrano valutazioni sinottiche degli aspetti più significativi relativi ai prodotti analizzati.

La Tabella 6 mostra l'elenco dei prodotti BIPV schedati, correlati alle rispettive categorie di applicazione (per queste ultime, cfr. Tabella 3). La maggior parte dei prodotti analizzati presenta una grande versatilità di applicazione, con una maggiore flessibilità funzionale ascrivibile ai moduli BIPV vetro-vetro semi-trasparenti o traslucidi (es. BIPV 17b - 20b). D'altro canto, una maggiore predeterminazione funzionale può essere vantaggiosa, poiché in tal caso il prodotto può essere equiparato ad un sistema costruttivo di tipo convenzionale per l'edilizia in termini commerciali e tecnico-prestazionali dai potenziali acquirenti (es. pavimenti o frangisole BIPV).

**Tabella 6 - Correlazione tra prodotti schedati e categorie di applicazione.**

**Legenda.** C1: copertura discontinua, C2: copertura continua, C3: copertura vetrata/atrio/lucernario; F1: facciata continua, F2: facciata ventilata, F3: facciata a doppia pelle, F4: serramento; D1: parapetto/coronamento, D2: frangisole, D3: pensilina/tettoia/pergola.

Prodotti BIPV		Categorie di applicazioni classificate per Classi di Elementi Tecnici										
		n°	C1	C2	C3	F1	F2	F3	F4	D1	D2	D3
01	<b>Modulo-tegola opaco colorato</b> 	2	<input checked="" type="checkbox"/>									<input checked="" type="checkbox"/>
02	<b>Modulo di rivestimento opaco colorato</b> 	2					<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		
03	<b>Modulo-tegola opaco colorato</b> 	2	<input checked="" type="checkbox"/>									<input checked="" type="checkbox"/>
04	<b>Modulo di rivestimento opaco colorato</b> 	2					<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		
05	<b>Modulo di rivestimento opaco colorato</b> 	3	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		
06	<b>Modulo-tegola opaco terracotta</b> 	2	<input checked="" type="checkbox"/>									<input checked="" type="checkbox"/>

Prodotti BIPV		Categorie di applicazioni classificate per Classi di Elementi Tecnici										
		n°	C1	C2	C3	F1	F2	F3	F4	D1	D2	D3
07	<b>Modulo-tegola opaco nero</b> 	3	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
08	<b>Modulo di rivestimento opaco colorato</b> 	3	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
09	<b>Modulo di rivestimento opaco colorato</b> 	3	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
10	<b>Modulo di rivestimento opaco bianco</b> 	2	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>				
11	<b>Modulo-tegola opaco flessibile</b> 	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
12	<b>Modulo opaco flessibile</b> 	1		<input checked="" type="checkbox"/>								
13	<b>Modulo flessibile</b> 	1		<input checked="" type="checkbox"/>								
14a	 <b>Pavimento sopraelevato traslucido</b>	1		<input checked="" type="checkbox"/>								
14b	 <b>Pavimento sopraelevato semi-trasparente</b>	1		<input checked="" type="checkbox"/>								
15	<b>Pavimento sopraelevato opaco</b> 	1		<input checked="" type="checkbox"/>								
16	<b>Modulo vetrato semi-trasparente</b> 	2								<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
17a	<b>Modulo vetrato semi-trasparente</b> 	2									<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17b	<b>Modulo vetrato strutturale semi-trasp.</b> 	6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>
18	<b>Modulo vetrato strutturale semi-trasp.</b> 	7			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				
19	<b>Modulo vetrato semi-trasparente</b> 	4			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
20a	 <b>Modulo vetrato traslucido (doppio vetro)</b>	7			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				

Prodotti BIPV		Categorie di applicazioni classificate per Classi di Elementi Tecnici										
		n°	C1	C2	C3	F1	F2	F3	F4	D1	D2	D3
20b	 <b>Modulo vetrato traslucido (triplo vetro)</b>	5			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
21a	 <b>Parapetto vetrato semi-trasparente</b>	1								<input checked="" type="checkbox"/>		
21b	 <b>Parapetto vetrato semi-trasparente</b>	1								<input checked="" type="checkbox"/>		
22	 <b>Parapetto vetrato traslucido</b>	1								<input checked="" type="checkbox"/>		
23a	 <b>Frangisole a lamelle opaco scorrevole</b>	1									<input checked="" type="checkbox"/>	
23b	 <b>Frangisole a lamelle opaco fisso</b>	1									<input checked="" type="checkbox"/>	
24	 <b>Frangisole a lamelle</b>	1									<input checked="" type="checkbox"/>	
25	 <b>Pensilina frangisole semi-trasparente</b>	1										<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Numero di Prodotti BIPV impiegabili per ciascuna categoria di applicazione (CET)</b>		<b>9</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	
		C1	C2	C3	F1	F2	F3	F4	D1	D2	D3	
		Copertura			Facciata				Dispositivi esterni			

In relazione alle caratteristiche produttive, la Tabella 7 (a seguire) mostra che 27 su 30 dei prodotti BIPV schedati può essere personalizzato nella forma, colore, finiture e/o formati. La maggior parte dei produttori presenta una gamma di produzione standard, con la possibilità di realizzare prodotti custom su richiesta del cliente, in base alla capacità offerta delle linee produttive aziendali<sup>33</sup>.

La stessa tabella mostra che l’offerta commerciale in Italia è ancora dominata dal silicio cristallino (24 prodotti su 30)<sup>34</sup>, per i maggiori vantaggi in termini di efficienza di conversione, affidabilità, prezzo. Alcuni produttori offrono la possibilità di integrare nel modulo BIPV differenti tecnologie fotovoltaiche, in funzione delle esigenze specifiche di progetto, ma si tratta perlopiù di produttori esteri con efficaci canali di vendita nel nostro paese (es. BIPV 05, 10, 24).

Per ciò che attiene la composizione dei moduli fotovoltaici, escludendo i moduli flessibili (3 su 30), costituiti da materiali polimerici incapsulanti di diversa natura, i moduli BIPV di tipo rigido più diffusi e dalle caratteristiche più vantaggiose in termini di potenziale personalizzazione e versatilità sono i cosiddetti laminati vetro-vetro (19 su 30).

<sup>33</sup> Prodotti BIPV standard: 3/30; prodotti BIPV custom: 7/30; prodotti BIPV standard/custom: 20/30.

<sup>34</sup> Prodotti BIPV con tecnologia in silicio cristallino (c-Si): 21/30; prodotti BIPV con tecnologia in film sottile (FS): 6/30; prodotti BIPV con tecnologia in silicio cristallino/film sottile: 3/30.

**Tabella 7. Caratteristiche produttive.**

**Legenda.** Produttore - IT: italiano; EU: europeo; Produzione - ST: standard; CU: custom; Tecnologia FV - c-Si: silicio cristallino, FS: film sottile; Composizione - GG: glass-glass (vetro-vetro), GB: glass-backsheet (vetro-backsheet), IGU: insulated glass unit (vetrocamera), FB: front sheet-backsheet.

Prodotti BIPV	Caratteristiche produttive								
	Produttore	Produzione		Tecnologia FV		Composizione			
	IT/EU	ST	CU	c-Si	FS	GG	IGU	GB/FB	
01	Modulo-tegola opaco colorato	ENERGYGLASS (IT)	ST	CU	c-Si		GG		
02	Modulo di rivestimento opaco colorato	ENERGYGLASS (IT)	ST	CU	c-Si		GG		
03	Modulo-tegola opaco colorato	SUNAGE - SUNCOL (CH)	ST	CU	c-Si		GG		
04	Modulo di rivestimento opaco colorato	SUNAGE - SUNCOL (CH)	ST	CU	c-Si		GG		
05	Modulo di rivestimento opaco colorato	KROMATIX (CH)		CU	c-Si	FS	GG		
06	Modulo-tegola opaco terracotta	ISSOL (BE)	ST	CU	c-Si		GG		GB
07	Modulo-tegola opaco nero	3S SOLAR PLUS (CH)	ST	CU	c-Si				GB
08	Modulo di rivestimento opaco colorato	TRIENERGIA (IT)	ST	CU	c-Si				GB
09	Modulo di rivestimento opaco colorato	SUNERG (IT)	ST	CU	c-Si				GB
10	Modulo di rivestimento opaco bianco	SOLAXESS (CH)		CU	c-Si	FS			GB
11	Modulo-tegola opaco flessibile	TEGOSOLAR (IT)	ST			FS			FB
12	Modulo opaco flessibile	GENERAL SOLAR (IT)	ST			FS			FB
13	Modulo flessibile	SOLBIAN (IT)	ST	CU	c-Si				FB
14a	Pavimento sopraelevato traslucido	ONYX SOLAR (ES)	ST	CU		FS	GG		
14b	Pavimento sopraelevato semi-trasp.	ONYX SOLAR (ES)	ST	CU	c-Si		GG		
15	Pavimento sopraelevato opaco	INVENT FLOOR (IT)	ST	CU	c-Si				GB
16	Modulo vetrato semi-trasparente	VGS (IT)	ST		c-Si				GB
17a	Modulo vetrato semi-trasparente	ENERGYGLASS (IT)	ST	CU	c-Si		GG		
17b	Modulo vetrato strutturale semi-trasp.	ENERGYGLASS (IT)	ST	CU	c-Si		GG	IGU	
18	Modulo vetrato strutturale semi-trasp.	UNION GLASS (IT)		CU	c-Si		GG	IGU	
19	Modulo vetrato semi-trasparente	PILKINGTON (IT)	ST	CU	c-Si		GG	IGU	
20a	Modulo vetrato traslucido (2Vetri)	ONYX SOLAR (ES)	ST	CU		FS	GG	IGU	
20b	Modulo vetrato traslucido (3Vetri)	ONYX SOLAR (ES)	ST	CU		FS	GG	IGU	
21a	Parapetto vetrato semi-trasparente	ENERGYGLASS (IT)	ST	CU	c-Si		GG		
21b	Parapetto vetrato semi-trasparente	ENERGYGLASS (IT)	ST	CU	c-Si		GG		
22	Parapetto vetrato traslucido	ONYX SOLAR (ES)		CU		FS	GG		
23a	Frangisole a lamelle opaco, scorrevole	ABBA (IT)		CU	c-Si				GB
23b	Frangisole a lamelle opaco, fisso	ABBA (IT)		CU	c-Si				GB
24	Frangisole a lamelle	METRA (IT)		CU	c-Si	FS	GG		GB
25	Pensilina frangisole semi-trasparente	ENERGYGLASS (IT)	ST	CU	c-Si		GG		

**Tabella 8. Indicatori di integrabilità architettonica (cfr. paragrafo 3.3).**

**Legenda.** 1.1 Personalizzazione geometrica, 1.2 Disponibilità di *dummies*, 2.1a Personalizzazione del pattern, 2.1b Non percepibilità del sistema fotovoltaico, 2.2 Personalizzazione della finitura, 2.3 Possibilità di installazione senza cornice, 3.1 Personalizzazione cromatica, 4.1 Flessibilità di installazione.

Prodotti BIPV	Indicatori di integrabilità architettonica								
	Tot.	1.1	1.2	2.1a	2.1b	2.2	2.3	3.1	4.1
01 Modulo-tegola opaco colorato	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
02 Modulo di rivestimento opaco colorato	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
03 Modulo-tegola opaco colorato	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				
04 Modulo di rivestimento opaco colorato	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				
05 Modulo di rivestimento opaco colorato	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
06 Modulo-tegola opaco terracotta	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		
07 Modulo-tegola opaco nero	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
08 Modulo di rivestimento opaco colorato	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
09 Modulo di rivestimento opaco colorato	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10 Modulo di rivestimento opaco bianco	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11 Modulo-tegola opaco flessibile	3				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
12 Modulo opaco flessibile	3				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
13 Modulo flessibile	6	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				
14a Pavimento sopraelevato traslucido	3	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	
14b Pavimento sopraelevato semi-trasp.	2	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>	
15 Pavimento sopraelevato opaco	5	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
16 Modulo vetrato semi-trasparente	3			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
17a Modulo vetrato semi-trasparente	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17b Modulo vetrato strutturale semi-trasp.	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18 Modulo vetrato strutturale semi-trasp.	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19 Modulo vetrato semi-trasparente	4	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
20a Modulo vetrato traslucido (doppio vetro)	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20b Modulo vetrato traslucido (triplo vetro)	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21a Parapetto vetrato semi-trasparente	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21b Parapetto vetrato semi-trasparente	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
22 Parapetto vetrato traslucido	7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				
23a Frangisole a lamelle opaco, scorrevole	3	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23b Frangisole a lamelle opaco, fisso	3	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24 Frangisole a lamelle	3	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
25 Pensilina frangisole semi-trasparente	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Ricorrenza degli indicatori di integrabilità architettonica nelle schede prodotto</b>		<b>26</b> 87%	<b>19</b> 63%	<b>6</b> 20%	<b>17</b> 57%	<b>9</b> 30%	<b>23</b> 77%	<b>24</b> 80%	<b>25</b> 83%

In relazione agli indicatori di integrabilità architettonica, la Tabella 8 (nella pagina precedente) mostra che 26 su 30 dei prodotti BIPV schedati può essere personalizzato dal punto di vista geometrico (forma e dimensioni), un requisito indispensabile per l'adozione di soluzioni fotovoltaiche integrate. Altri indicatori ricorrenti nella maggior parte dei prodotti sono la flessibilità di installazione (25 su 30), la possibilità di installazione senza cornice (23 su 30), a vantaggio di una percezione omogenea delle superfici, e la possibilità di produrre moduli dummies (19 su 30), ossia elementi costruttivi di tipo passivo, identici da un punto di vista morfologico e tecnologico ai moduli attivi. La personalizzazione di tipo morfologico, come già anticipato nel paragrafo 3.3, si attesta su due ipotesi progettuali: mantenere la visibilità/riconoscibilità delle celle fotovoltaiche e utilizzarle come elemento di design, lavorando sul *pattern* (2.1a) o rendere la cella FV "invisibile", mimetizzandola mediante l'adozione di accorgimenti progettuali e tecnologie in grado di nascondere (2.1b). Il campione di prodotti BIPV analizzati mostra che la maggior parte dei produttori punta al raggiungimento dell'obiettivo di mimesi delle tecnologie fotovoltaiche (17 prodotti su 30), lavorando sulla personalizzazione dei colori (24 su 30) e delle finiture superficiali (9 su 30). In Italia, più che all'estero, la possibilità di mantenere le celle fotovoltaiche a vista è ancora considerata un'ipotesi formalmente percorribile (6 prodotti su 30), lavorando sulla densità (e talvolta sul colore) di queste ultime, di modo che divengano parte integrante del progetto dell'involucro e puntando sulla massimizzazione delle performance energetiche.

#### *Considerazioni sui cataloghi di casi studio*

Si è ritenuto significativo, ai fini della presente ricerca, indagare un campione di 150 *casi di successo*, di cui 60 riferiti ad esempi nazionali e 90 ad esempi europei (schede sintetiche); 30 di questi casi sono stati ulteriormente approfonditi, in qualità di *buone pratiche*, di cui n.15 riferite ad esempi nazionali e n.15 ad esempi europei (schede analitiche).

Le tabelle e i grafici che seguono mostrano gli aspetti più significativi dei progetti analizzati, sia in termini assoluti che relativi.

Nella Tabella 9 si riporta l'elenco completo dei casi studio, specificando le destinazioni d'uso con diversi colori, numerando progressivamente i casi approfonditi nel Catalogo di buone pratiche ed esplicitando il tipo d'intervento (ex novo/retrofit) e la classe di Elementi Tecnici interessata dall'integrazione fotovoltaica. Si è inteso riportare altresì due parametri ritenuti significativi per l'elaborazione di un'analisi comparata dei diversi sistemi BIPV impiegati nel progetto di architettura: la trasparenza e la tecnologia fotovoltaica, cercando di comprendere quali sono i sistemi più diffusi e con maggiori potenzialità di crescita nel mercato italiano.

Nella Tabella 10 sono riportati dei grafici a torta per mostrare più dettagliatamente, in termini percentuali, le caratteristiche dei casi studio indagati in rapporto a ciascuna delle categorie summenzionate, mettendo a confronto casi studio italiani ed europei. Si osserva una generale equità nel numero di casi studio italiani per ciascuna unità tecnologica, mentre i casi studio europei mostrano una netta prevalenza di integrazioni di BIPV in facciata (58% dei casi), indipendentemente dalla destinazione d'uso degli edifici. In entrambi i casi l'integrazione di sistemi e componenti BIPV in progetti ex novo è nettamente prevalente rispetto ad interventi di retrofit tecnologico, con un'accentuazione di tale percentuale per i casi europei (75% dei casi). Infine, per quanto riguarda le destinazioni d'uso degli edifici in cui sono integrati i sistemi BIPV, in Italia vi è una dominanza di interventi realizzati su edifici direzionali e amministrativi (42% dei casi), in particolare per l'ex novo; una delle motivazioni risiede nel minor numero di barriere all'implementazione BIPV, anche in virtù del fatto che i proprietari sono spesso grandi multinazionali con capitali da investire nelle energie rinnovabili. Salvo rari casi, si rileva un numero insufficiente di progetti esemplari nel settore residenziale, la maggior parte dei quali sono concentrati su edifici isolati e/o unifamiliari. Al contrario, gli esempi europei mostrano come l'integrazione dei BIPV sia tecnicamente possibile, conveniente ed efficace anche (e soprattutto) nel settore residenziale (40% dei casi).

**Tabella 9. Elenco dei Casi studio italiani ed europei.**

**Legenda.** S: schede sintetiche (casi di successo), A: schede analitiche (buone pratiche); UT: Unità tecnologica; *Tipo d'intervento* - ex novo/retrofit. *CET: Classi di Elementi Tecnici* - C1: copertura discontinua, C2: copertura continua, C3: copertura vetrata/lucernario; F1: facciata continua, F2: facciata ventilata, F3: facciata a doppia pelle, F4: serramento; D1: parapetto/coronamento, D2: frangisole, D3: pensilina/tettoia/ pergola. *Trasparenza* - opaco/semi-trasparente/traslucido. *Tecnologia fotovoltaica* - c-Si: silicio cristallino, mono-Si: silicio monocristallino, multi-Si: silicio policristallino, Si-PERC: Passivated Emitter and Rear Contact, FS: film sottile, a-Si: silicio amorfo, CIS/CIGS: (di)seleniuro di rame indio gallio, CdTe: tellururo di cadmio, OPV: fotovoltaico organico, DSSC: celle di Grätzel o dye-sensitized solar cell; HJT: eterogiunzioni. *Destinazione d'uso.* ■ Residenziale, ■ Direzionale, ■ Culturale, ■ Commerciale/Produttivo

S	A	Casi studio italiani	Intervento	CET	Trasparenza	Tecnologia FV
23	4	UT. COPERTURA				
■	1	Chalet La Pedevilla, Marebbe	ex novo	C1	opaco	mono-Si
■		Casa B, Almenno S. Salvatore	ex novo	C1	opaco	mono-Si
■	2	Parco Urbano Isola La Certosa, Venezia	retrofit	C1	opaco	mono-Si
■		Prysmian HQ, Milano	ex novo	C1	opaco	c-Si
■	3	Villa Castelli, Bellano	retrofit	C2	opaco	mono-Si
■		Scuola Materna, Folzano	ex novo	C2	opaco	FS (a-Si)
■		Fondazione Museo Pino Pascali, Polignano	retrofit	C2	opaco	FS (a-Si)
■		Casa plurifamiliare, Appiano	retrofit	C2	opaco	FS (a-Si)
■		Chiesa parrocchiale di Millan, Bressanone	retrofit	C2	opaco	mono-Si
■		Oratorio NZEB, Rezzato	ex novo	C2	opaco	multi-Si
■		Residenza I Cristalli, Latina	ex novo	C3	semi-tr	c-Si
■		Energy Center PoliTO, Torino	ex novo	C3, F1	semi-tr	mono-Si
■		Fondazione Mediterranea Terina, Lamezia Terme	ex novo	C3, F1	traslucido	FS (a-Si)
■		Nuova sede Comune di Formigine	ex novo	C3	semi-tr	mono-Si
■		Museo dei Bambini Explora, Roma	retrofit	C3, D2	semi-tr	c-Si
■		Ksenia Security, Ripatransone	ex novo	C3	semi-tr	mono-Si bifacciali
■		Cantina di Colterenzio, Appiano	retrofit	C3	semi-tr	mono-Si
■		Edificio agricolo a San Genesio	retrofit	C3	semi-tr	multi-Si
■		Stazione funivia di Naturno	ex novo	C3, F1	semi-tr	multi-Si
■	4	Stazione AV Porta Susa, Torino	ex novo	C3	semi-tr	mono-Si
23	6	UT. FACCIATA				
■	5	Ospedale Meyer, Firenze	ex novo	F1	semi-tr	multi-Si
■	6	Palazzo Lombardia, Milano	ex novo	F1	semi-tr	mono-Si
■		Torre Gioia 22, Milano	ex novo	F1	opaco	c-Si
■		CMB Headquarters, Roma	ex novo	F1	semi-tr	multi-Si
■		2Degrees Building, Milano	retrofit	F1	semi-tr	mono-Si

S	A	Casi studio italiani	Intervento	CET	Trasparenza	Tecnologia FV
		Sede CVA di Chatillon, Aosta	ex novo	F1	semi-tr	multi-Si
	7	Enzian office, Bolzano	ex novo	F4, F2, D1	traslucido, opaco	FS (a-Si)
	8	Edificio residenziale in Via Brisa, Milano	retrofit	F2	opaco	mono-Si
		Torre B1 Polo commerciale Porte di Roma	ex novo	F2	opaco	multi-Si
		Edificio ex-Poste, Bolzano	retrofit	F2	opaco	multi-Si
	9	Palazzo Argonauta, Roma	retrofit	F2	opaco	multi-Si
		World Join Centre, Milano	ex novo	F2	traslucido	FS (CIS)
		Torre Unipol, Bologna	ex novo	F2	opaco	mono-Si
		Camera di Commercio, Bolzano	ex novo	F2	opaco	mono-Si
		Centrale di teleriscaldamento a Laces	ex novo	F2	opaco, semi-tr.	mono-Si
		Oversea building, Chioggia	ex novo	F3	semi-tr	multi-Si
	10	Grattacielo Intesa San Paolo, Torino	ex novo	F3	opaco	multi-Si
		Grattacielo Regione Piemonte, Torino	ex novo	F3	semi-tr	c-Si
		Torre Hafner, Bolzano	ex novo	F3	opaco	mono-Si
		Verona Forum	ex novo	F3, F1	opaco, traslucido	mono-Si, FS (CIS)
		Sede Centrale A22 Autobrennero, Trento	ex novo	F3	opaco, traslucido	FS (CIS)
		Sede Schüco, Padova	ex novo	F3	traslucido	FS (a-Si)
		Smart Lab, Rovereto	ex novo	F3	traslucido	FS ( $\mu$ -Si)
17	5	UT. DISPOSITIVI ESTERNI INTEGRATI				
		Hotel Torre Bassano, Torre del Greco	retrofit	D1	traslucido	FS (a-Si)
	11	Casa privata a Lasa, Bolzano	ex novo	D1	semi-tr	mono-Si
		Riqualificazione condominiale a Milano	retrofit	D1	semi-tr	mono-Si bifacciali
		Grand Hotel Leon D'oro, Bari	retrofit	D2	semi-tr	multi-Si
	12	POLINS, Portogruaro	ex novo	D2	opaco	multi-Si
		Quartiere Le Albere, Trento	ex novo	D2	opaco, semi-tr	multi-Si
		Museo della Scienza MuSe, Trento	ex novo	D2	semi-tr	multi-Si
		Roma Convention Center La Nuvola	ex novo	D2	opaco	c-Si
	13	ERGO Assicurazioni, Milano	retrofit	D3	semi-tr	mono-Si
		Nuovo centro direzionale a Tolentino	ex novo	D3	semi-tr	mono-Si bifacciali
	14	Hotel Luna Capri	retrofit	D3	semi-tr	multi-Si
		Ûtia da Ju, Piz de Plaies, San Martino di Badia	retrofit	D3	semi-tr	multi-Si
		Camping Europa, Cavallino	retrofit	D3	semi-tr	mono-Si
		Residenza privata a Napoli	retrofit	D3	semi-tr	mono-Si

S	A	Casi studio italiani	Intervento	CET	Trasparenza	Tecnologia FV
		Piazza Gae Aulenti, Milano,	ex novo	D3	semi-tr	mono-Si
		Stazione di Sesto San Giovanni, Milano	ex novo	D3	semi-tr	c-Si
	15	Stazione Matera Centrale FAL	retrofit	D3	opaco	mono-Si
S	A	Casi studio europei	Intervento	CET	Trasparenza	Tecnologia FV
21	3	UT. COPERTURA				
		Doragno castle (CH)	retrofit	C1	opaco	mono-Si
		Rural House Galley, Ecuwillens (CH)	retrofit	C1	opaco	mono-Si
		The Solar Chalet, Zweisimmen (CH)	ex novo	C1	opaco	mono-Si
		Historical Building in Affoltern (CH)	retrofit	C1	opaco	mono-Si
		Schneller Bader House, Tamins (CH)	ex novo	C1	opaco	mono-Si
	1	Umwelt Arena Schweiz, Spreitenbach (CH)	ex novo	C1	opaco	mono-Si
	2	St. Francis Church, Ebmatingen (CH)	retrofit	C1	opaco	mono-Si
		Frasco Avalanche Shelter (CH)	ex novo	C2	opaco	FS (a-Si)
		Sunny Woods (CH)	ex novo	C2	opaco	FS (a-Si)
		AWM carport, Munich (DE)	retrofit	C2	traslucido	FS (a-Si)
		Cité du Design de Saint-Etienne (FR)	ex novo	C2, C3	opaco, trasl., semi-tr	mono-Si, FS
		Swatch Omega HQ, Bienne (CH)	ex novo	C2	opaco	multi-Si
		Greeting to the Sun, Zadar (HR)	ex novo	C2	opaco	mono-Si
		Mercato Di Béjar, Salamanca (ES)	retrofit	C3	traslucido	FS (a-Si)
		Azurmendi Restaurant, Biscay (ES)	ex novo	C3, F1	traslucido	FS (a-Si)
		Mercato di San Anton, Madrid (ES)	retrofit	C3	traslucido	FS (a-Si)
		ING Direct Bank, Madrid (ES)	ex novo	C3	traslucido	FS (a-Si)
		Università di Valladolid - LUCIA (ES)	ex novo	C3	traslucido	FS (a-Si)
	3	Mont-Cenis Academy, Herne-Sodingen (DE)	ex novo	C3, F1	semi-tr	mono-Si, multi-Si
		Diamond Exchange Capitol C, Amsterdam (NL)	retrofit	C3	semi-tr	multi-Si
		Liceo Lucie Aubrac, Courbevoie (FR)	ex novo	C3	semi-tr	c-Si
53	10	UT. FACCIATA				
	4	Energy Cube Stadtwerke Konstanz (DE)	ex novo	F1, C3	semi-tr	mono-Si
		Hotel Industriel, Fondation Abbé Pierre, Paris (FR)	retrofit	F1, C3, D1	semi-tr	mono-Si
		Audi Brand Experience Center, Munich (DE)	ex novo	F1	semi-tr	c-Si
		Tobias Grau Lighting HQ, Rellingen (DE)	ex novo	F1	semi-tr	mono-Si
		KTH Auditorium, Stockholm (SE)	retrofit	F1	semi-tr	multi-Si
		Asilo nido +E Kita, Marburg (DE)	ex novo	F1	opaco	mono-Si

S	A	Casi studio europei	Intervento	CET	Trasparenza	Tecnologia FV
		PV Pavillion, Potsdam (DE)	ex novo	<b>F1</b>	opaco	FS (CIS)
	5	Energimidt, Copenhagen (DK)	ex novo	<b>F2, F4, D1, D2</b>	semi-tr, traslucido	mono-Si, FS (a-Si)
	6	Student Housing Silo Bleu, Renens (CH)	ex novo	<b>F2, C3</b>	opaco	mono-Si
		Grosspeter Tower, Basel (CH)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	FS (CIGS)
		Rifugio Monte Rosa, Zermatt (CH)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	mono-Si
		Rifugio Matterhorn Glacier, Zermatt (CH)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	mono-Si
		MFH Raeber, Biel (CH)	ex novo	<b>F2, D1</b>	opaco	multi-Si
		MFH Romanshorn (CH)	retrofit	<b>F2, D1</b>	opaco	HJT
		Palazzo Positivo Chiasso (CH)	retrofit	<b>F2, D1, D2</b>	opaco, semi-tr	FS (a-Si), mono-Si
		MFH Kollektivhuset Stacken, Göteborg (SE)	retrofit	<b>F2</b>	opaco	FS
		Centro polifunzionale Pregassona (CH)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	mono-Si
	7	Solar Silo, Basel (CH)	retrofit	<b>F2, C1</b>	opaco	mono-Si
	8	Copenhagen International School (DK)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	Si-PERC
		Brynseng Primary School, Oslo (NO)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	mono-Si
		MFH deltaROSSO, Vacallo (CH)	ex novo	<b>F2, C1</b>	opaco	mono-Si
		Social Housing Apartments, Best (NL)	ex novo	<b>F2, D1</b>	opaco	FS (CIGS)
	9	MFH Hofwiesenstraße, Zürich (CH)	retrofit	<b>F2, D1</b>	opaco	mono-Si
		MFH Autarchic Building, Brütten (CH)	ex novo	<b>F2, C1</b>	opaco	FS, mono-Si
	10	MFH Solaris 416, Zurich (CH)	ex novo	<b>F2, C1</b>	opaco	mono-Si
		MFH Männedorf (CH)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	Si PERC
		MFH Zurich - Höngg (CH)	ex novo	<b>F2, D1</b>	opaco	mono-Si
		Solsmaragden Offices, Drammen (NO)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	mono-Si
		Treurenberg office building, Bruxelles (BE)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	mono-Si
		MFH in Quai de Valmy 179, Paris (FR)	retrofit	<b>F2</b>	opaco	multi-Si
		SG Ennstal, Liezen (AT)	retrofit	<b>F2</b>	opaco	multi-Si
		LA CUB, Mériadeck Bordeaux (FR)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	multi-Si
	11	Paul Horn Arena, Tübingen (DE)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	multi-Si
		Student Housing, Aarhus (DK)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	multi-Si
		Solar XXI, Lisbona (PT)	ex novo	<b>F2</b>	opaco	multi-Si
	12	Wattbuck Tower, Illnau-Effretikon (CH)	retrofit	<b>F2</b>	opaco	mono-Si
		Solarsiedlung "Hintere Luegeten", Einsiedeln (CH)	ex novo	<b>F2, D1</b>	opaco	HJT, multi-Si
		Flumroc HQ (CH)	retrofit	<b>F2</b>	opaco	FS (CIS), mono-Si
		Hikari Building, Lyon (FR)	ex novo	<b>F3</b>	semi-tr	c-Si

S	A	Casi studio europei	Intervento	CET	Trasparenza	Tecnologia FV
■	13	GDF Suez, Dijon (FR)	retrofit	F3	semi-tr	mono-Si
■		Business Centre NEGUNDO 4, Tournai (BE)	retrofit	F3	semi-tr	mono-Si
■		Fronius "Aktiv Energy Tower", Wels (AT)	ex novo	F3	semi-tr	mono-Si
■		B.O.C. - Bonnheshof Office Centre, Düsseldorf (DE)	ex novo	F3	semi-tr	mono-Si
■		Tour Elithis Danube, Strasburgo (FR)	ex novo	F3	semi-tr	mono-Si
■		NEW - Blauhaus, Mönchengladbach (DE)	ex novo	F3	semi-tr	C-Si
■		Logistic Center V-Zug (CH)	ex novo	F3	semi-tr.	multi-Si
■		14 Unit Housing Development, Ijsselstein (NL)	ex novo	F3	opaco, traslucido	FS (a-Si)
■		Genyo HQ, Granada (ES)	ex novo	F3	traslucido	FS (a-Si)
■		The Black Box (ONYX Solar HQ), Avila (ES)	ex novo	F3	opaco	FS (a-Si)
■		ICSE, Las Palmas de Gran Canaria (ES)	ex novo	F3	traslucido	FS (a-Si)
■		La CREA, Rouen (FR)	ex novo	F3, D3	traslucido, semi-tr	Dichroic PV, mono-Si
■		House of music, Aalborg (DK)	ex novo	F3	semi-tr	FS
■		Car park in Vallastaden, Lindköping (SE)	ex novo	F3	traslucido	FS (CdTe)
17	2	UT. DISPOSITIVI ESTERNI INTEGRATI				
■		Torre C2 - Les Vergers, Meyrin (CH)	ex novo	D1	semi-tr	mono-Si
■		SFH Gutenberg (AT)	ex novo	D1	semi-tr	multi-Si
■		Student Housing, Slagelse (DK)	retrofit	D1, F2	semi-tr, opaco	mono-Si
■		MFH SonnenparkPLUS Wetzikon (CH)	ex novo	D1, F2	semi-tr, opaco	mono-Si
■	14	MFH Hofberg 6/7, Wil (CH)	ex novo	D1, C1	opaco	mono-Si
■		SFH Schmölzer House, Pratteln (CH)	ex novo	D1, D2	semi-tr	multi-Si
■		SFH Schnitterhaus, Nechlin (DE)	retrofit	D2	semi-tr	mono-Si
■		MFH Spinnereistraße, Hard (AT)	ex novo	D2	opaco	mono-Si
■		AGC Glass Europe, Gosselies (BE)	ex novo	D2	semi-tr	mono-Si
■		AZV Erdinger Moos, Eitting (DE)	ex novo	D2	semi-tr	multi-Si
■		MFH Kingsgate House, London (GB)	ex novo	D2	semi-tr	multi-Si
■		Service Public de Wallonie, Namur (BE)	retrofit	D2	semi-tr	c-Si
■		Freiburg City Hall (DE)	ex novo	D2	semi-tr	c-Si
■	15	SwissTech Convention Center EPFL, Losanna (CH)	ex novo	D2	traslucido	DSSC
■		Paris Courthouse (FR)	ex novo	D2	semi-tr	c-Si
■		Bénéteau Group HQ, Givrand (FR)	ex novo	D3	semi-tr	mono-Si
■		El Centre del Mon, Perpignan (FR)	ex novo	D3	semi-tr	multi-Si

**Tabella 10. Grafici sintetici di confronto tra casi studio italiani ed europei**

Categorie di integrazioni di BIPV (per Unità Tecnologiche)							
Casi studio italiani		n.	%	Casi studio europei		n.	%
Copertura		20	33,3%	Copertura		21	23%
Facciata		23	38,3%	Facciata		53	58%
Dispositivi esterni integrati		17	28,3%	Dispositivi esterni integrati		17	19%

Tipi di intervento							
Casi studio italiani		n.	%	Casi studio europei		n.	%
Ex novo		39	65%	Ex novo		68	75%
Retrofit		21	35%	Retrofit		23	25%

Destinazioni d'uso degli edifici							
Casi studio italiani		n.	%	Casi studio europei		n.	%
Residenziale		17	28%	Residenziale		36	40%
Direzionale		25	42%	Direzionale		30	33%
Culturale		8	13%	Culturale		15	16%
Commerciale/Produttivo		10	17%	Commerciale/Produttivo		10	11%

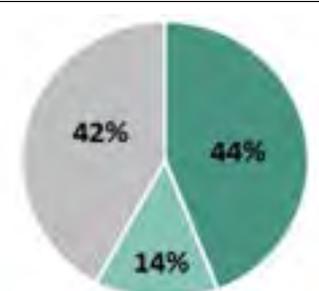
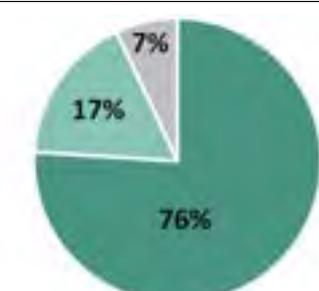
La Tabella 11 presenta un quadro sinottico riepilogativo in cui sono evidenziate le correlazioni tra destinazioni d’uso, tipi d’intervento e applicazioni categorizzate per Classi di Elementi Tecnici, operando una distinzione tra casi studio italiani ed europei; si evidenzia così nelle singole celle il numero di applicazioni indagate per ciascuna delle suddette categorie in termini assoluti. Per alcuni casi studio si rileva l’impiego di più sistemi BIPV in diverse parti dell’involucro edilizio, pertanto il numero totale di applicazioni riportate è superiore al numero di casi studio analizzati.

Leggendo il grafico in termini relativi, a priorità di classi di elementi tecnici, è possibile notare che l’integrazione dei BIPV in copertura è una scelta adottata indipendentemente dalla destinazione d’uso dell’edificio, con un numero totale di integrazioni BIPV (casi studio italiani + europei) lievemente superiore nel settore residenziale (34% dei BIPV); per l’integrazione in facciata si osserva una netta prevalenza del settore direzionale sulle altre categorie (51%); i dispositivi esterni integrati rappresentano una categoria dominante per il settore residenziale (55%), sia per progetti ex novo che di retrofit.

**Tabella 11. Quadro sinottico riepilogativo relativo ai casi studio.**

Integrazioni di BIPV		Destinazioni d’uso							
Classi di Elementi Tecnici (CET)	Tipi di intervento	■ Residenziale		■ Direzionale		■ Culturale		■ Comm./Prod.	
		IT	EU	IT	EU	IT	EU	IT	EU
C1 copertura discontinua	Ex novo	2	6				1	1	
	Retrofit		3	1	1		1		
C2 copertura continua	Ex novo		2		1	2	1		1
	Retrofit	2				2			1
C3 copertura vetrata/ atrio/lucernario	Ex novo	1	1	3	3		3	3	1
	Retrofit				2	1		2	2
<b>COPERTURA</b>	<b>50 BIPV</b>	5	12	4	7	5	6	6	5
		■ 17 (34%)		■ 11 (22%)		■ 11 (22%)		■ 11 (22%)	
F1 facciata continua	Ex novo			7	3	1	2	1	2
	Retrofit			1	1		1		
F2 facciata ventilata	Ex novo	1	13	4	7		2	1	1
	Retrofit	1	7	2	3				
F3 facciata a doppia pelle	Ex novo	1	2	7	5		4		2
	Retrofit				2				
F4 serramento	Ex novo			1	1				
	Retrofit								
<b>FACCIATA</b>	<b>86 BIPV</b>	3	22	22	22	1	9	2	5
		■ 25 (29%)		■ 44 (51%)		■ 10 (12%)		■ 7 (8%)	
D1 parapetto/ coronamento	Ex novo	1	9	1	1				
	Retrofit	2	4		1				
D2 frangisole	Ex novo	1	3	1	5	2	1		
	Retrofit	1	2		1	1			
D3 pensilina/tettoia/ pergola	Ex novo			1	1		1	2	1
	Retrofit	4		1				1	
<b>DISPOSITIVI ESTERNI INTEGRATI</b>	<b>49 BIPV</b>	9	18	4	9	3	2	3	1
		■ 27 (55%)		■ 13 (27%)		■ 5 (10%)		■ 4 (8%)	

**Tabella 12. Grafici sintetici sui parametri di trasparenza e tecnologie fotovoltaiche impiegate.**

Trasparenza		Tecnologie fotovoltaiche	
			
Casi studio italiani ed europei	%	Casi studio italiani ed europei	%
■ Opaco	44%	■ Cristallino (c-Si)	76%
■ Traslucido	14%	■ Film sottile (a-Si)	17%
■ Semi-trasparente	42%	■ Altro	7%

La Tabella 12 presenta le percentuali di impiego di moduli opachi, traslucidi e semi-trasparenti sul totale dei casi studio, nonché la ricorrenza delle diverse tecnologie fotovoltaiche.

Per quanto riguarda il parametro di *trasparenza*, è possibile notare che sul totale degli esempi progettuali analizzati, i moduli BIPV opachi e semi-trasparenti presentano quasi la stessa frequenza di impiego (42 - 44%), mentre solo in una percentuale ridotta di casi studio si osserva una integrazione di moduli BIPV traslucidi (14%). Occorre correlare questa evidenza al grafico delle *tecnologie fotovoltaiche*, che mostra una netta prevalenza di impiego di moduli (opachi o semi-trasparenti) con celle in silicio cristallino (monocristallino, policristallino, PERC, back contact, ecc.) sulle altre tecnologie fotovoltaiche (76% dei casi studio). Al secondo posto, con netto distacco (17%), si rileva un impiego di moduli con tecnologia a film sottile in silicio amorfo (perlopiù traslucidi), mentre l'insieme delle altre tecnologie (film sottile in CIGS, CdTe, DSSC o eterogiunzioni) rappresenta solo una piccolissima percentuale sul totale dei casi indagati (7%).

### 3.6 Criticità e potenzialità di applicazione dei sistemi BIPV e possibili obiettivi di innovazione

L'analisi dello stato dell'arte riferito alla produzione di sistemi e componenti BIPV e alla loro applicazione in progetti di architettura mostra come, nonostante le ottime premesse e un quadro generale favorevole, sussistano ancora una serie di criticità e barriere legate alla penetrazione diffusa dei BIPV nel mercato delle costruzioni, sia a livello nazionale che internazionale. Una serie di richieste degli stakeholder non adeguatamente affrontate nella *value chain* del BIPV, che consistono soprattutto in questioni economiche, tecnologiche, legali, di affidabilità e normative, sono la causa principale della deviazione tra le previsioni di crescita e quanto misurato dagli analisti del settore.

Già nel 2005 veniva sottolineato come i problemi del cosiddetto *solar design* consistessero principalmente nel vasto *gap* informativo fra i risultati della ricerca e la conoscenza applicata nella pratica. Inoltre, veniva lamentata una generale incapacità nel promuovere il prodotto, condizione indispensabile per il diffondersi delle nuove tecnologie [97].

Tra gli studi più recenti relativi all'identificazione delle barriere che limitano l'uso diffuso dei BIPV nel settore delle costruzioni, il report prodotto dall'IEA SHC Task 41[98], pubblicato nel 2012, presenta un'analisi dettagliata dei risultati di una complessa indagine internazionale, basata sull'intervista a professionisti del settore edile (di cui la maggior parte architetti e ingegneri). L'indagine del Task 41 ha rilevato 18 barriere classificate in sei gruppi: *interesse, economia, conoscenza, informazione, prodotti e processo*. Tra gli aspetti critici maggiormente rilevanti, emergeva la percezione da parte degli intervistati del non ritenere *economicamente* giustificabile l'integrazione di componenti fotovoltaici, la mancanza di *conoscenze* tecniche da parte dei professionisti, e una generale assenza di *interesse* sulle tecnologie BIPV [98].

Nel 2013, il team di ricerca del Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM) ha individuato una serie di barriere legate ad un uso diffuso dei BIPV, tra cui *estetiche* (inadeguatezza estetico-formale delle soluzioni proposte), *normative, tecniche* (mancanza di installatori esperti e criticità nella rispondenza ai requisiti di durabilità, affidabilità e manutenibilità dei moduli) *di mercato* (informazioni sui prodotti incomplete o inadeguate), *economiche* (assenza di sovvenzioni statali) [99].

Parte di queste criticità oggi si ritiene superata. In particolare, si rileva dall'analisi dei casi studio un rinnovato interesse nei confronti di queste tecnologie, dovuto ad una maggiore consapevolezza dei vantaggi derivanti dall'impiego delle soluzioni BIPV nell'attuale contesto della transizione energetica e da un'offerta di mercato molto più ampia e articolata rispetto a quella in commercio fino a dieci anni fa.

Si riportano di seguito alcune tra le più ricorrenti criticità di applicazione e diffusione dei sistemi BIPV, che se adeguatamente affrontate potrebbero portare ad una penetrazione diffusa dei BIPV nel mercato europeo e, in particolare, italiano.

#### Criticità economiche

I sistemi BIPV sono considerati ancora una soluzione di nicchia dell'industria solare da architetti e imprenditori, percepita come troppo costosa o sperimentale rispetto a sistemi di tipo tradizionale (BAPV), nonostante la drastica riduzione dei costi di produzione negli ultimi anni li abbia resi enormemente più competitivi. Le questioni legate ai costi tendono ad essere citate come un ostacolo, con dubbi espressi sulla longevità dei prodotti e sulle problematiche relative alla manutenzione.

I BIPV non dovrebbero essere valutati solo sulla base dei costi di investimento: dopo un primo esborso di costi di progettazione e finanziamento, la multifunzionalità dei moduli BIPV ha un effetto favorevole sui costi complessivi del progetto e sull'ammortamento dell'impianto fotovoltaico stesso; i bassi costi di esercizio degli edifici ad alta efficienza energetica con una quota significativa di elettricità generata da fotovoltaico hanno un valore a lungo termine; inoltre, il costo complessivo dell'installazione può essere compensato sfruttando la stessa manodopera impiegata per i materiali standard da costruzione.

Sebbene sia ammissibile un costo iniziale maggiore, l'investimento netto per la selezione dei BIPV rispetto ad altri materiali da costruzione non dovrebbe mai superare il 20-30% del budget iniziale. In altre parole, il costo del BIPV dovrebbe essere prossimo a quello dei componenti per l'edilizia rispondenti ad analoghi requisiti di

tipo passivo. Inoltre, il tempo di recupero dell'investimento dovrebbe essere percepito come competitivo (circa 5-7 anni), offrendo una reale redditività economica.

Infine, poiché la maggior parte dei paesi europei ha abrogato o ridotto i regimi di sostegno e gli incentivi ai sistemi fotovoltaici, come le tariffe feed-in, è necessario massimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta, considerando altresì il profilo orario del fabbisogno energetico dell'edificio, al fine di massimizzare i benefici economici dell'impianto [77]. Alcuni produttori ritengono che la tassazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> aiuterebbe l'adozione da parte del mercato di molte tecnologie integrate dell'involucro solare [28].

#### *Criticità normative*

La mancanza di metodi e riferimenti di prova adeguati, nonché la presenza di lacune normative, ostacolano la diffusione di prodotti integrati innovativi. Questo scenario è ulteriormente complicato dal variegato panorama di codici e norme che differiscono da paese a paese [28]. Gli sforzi della comunità scientifica e l'azione delle industrie in crescita possono portare a un'accelerazione dei processi di standardizzazione e allo sviluppo di norme tecniche specifiche (come è avvenuto per lo standard di riferimento IEC 63092-1:2020 [19], che si integrino con quelle locali, vigenti nei diversi paesi dell'Unione Europea.

#### *Criticità nel trasferimento di informazioni*

Le ricerche mostrano che i due aspetti maggiormente legati alla mancanza di diffusione dei sistemi BIPV tra i progettisti, nonché tra loro interrelati, sono la mancanza di informazioni chiare e conoscenze specifiche sulle tecnologie BIPV e l'insufficiente qualità espressiva di alcune soluzioni. Se da un lato l'industria ha dimostrato che la tecnologia BIPV è fattibile, affidabile e in alcuni casi anche conveniente, dall'altro le informazioni su questi sistemi non sono ancora sufficienti, e questa condizione si traduce in concrete difficoltà per gli architetti nella scelta di componenti adeguati alle normative vigenti.

La documentazione disponibile per i prodotti BIPV è spesso strettamente limitata a schede dati elementari importate direttamente dai pannelli fotovoltaici convenzionali, che raccolgono solo prestazioni e caratteristiche di base (principalmente elettriche) [84].

Analogamente, è possibile enunciare alcune considerazioni in merito al rapporto di reciprocità esistente tra una produzione BIPV efficace e i target raggiunti in molti dei casi studio analizzati. In diversa misura, nei progetti analizzati, assai eterogenei e diversificati, sono stati conseguiti risultati promettenti in termini di sviluppo e impiego di prodotti BIPV, diffusione di buone pratiche e definizione di nuove metodologie di integrazione architettonica. L'analisi ha dunque condotto all'individuazione di alcuni fattori chiave, che si ritiene possano contribuire al posizionamento strategico delle aziende produttrici di moduli e sistemi BIPV nel mercato italiano.

#### *Processi integrati*

La difficoltà di intraprendere un approccio integrato fin dalle prime fasi della progettazione rimane uno dei maggiori ostacoli alla diffusione di componenti e sistemi BIPV.

Il problema della mancanza di esperienza nel campo BIPV di architetti e installatori e l'assenza di coordinamento tra i partner chiave del processo decisionale (proprietari, fornitori, installatori, ecc.) potrebbero essere risolti tramite servizi di consulenza BIPV e processi di digitalizzazione dell'intera *value chain*. L'attivo coinvolgimento e la cooperazione fin dalle prime fasi di concezione del manufatto tra tutti i soggetti coinvolti, compreso il responsabile BIPV, potrebbe semplificare l'intero processo. Inoltre, una manualistica aggiornata, tutorial e repertori di soluzioni tecniche e dettagli costruttivi destinati alla progettazione, realizzazione e gestione delle installazioni potrebbero semplificare le attività progettuali e cantieristiche [77; 89].

Tutti i casi studio analizzati presentano fattori di successo legati alla volontà di integrare i sistemi BIPV come prerequisito del progetto da parte dei soggetti coinvolti nel processo decisionale. La collaborazione tra settore di ricerca, progettisti e mondo della produzione permette di sviluppare progetti di innovazione tecnologica che trovano reali applicazioni nel mondo delle costruzioni, sviluppando soluzioni ben integrate dal punto di vista architettonico ed economico con risultati tangibili in termini di qualità.

### *Offerta di servizi e responsabilità dei produttori*

Uno dei fattori chiave per colmare il divario tra fotovoltaico e settore edile è il ruolo dei produttori: il know how e la complessità caratteristica del mondo delle costruzioni potrà soccorrere il settore BIPV, gettando le basi per un nuovo percorso metodologico comune, creando opportunità di collaborazione tra ricerca e industria. Una rinnovata e più approfondita informazione tecnica sul BIPV in termini di qualità e requisiti costruttivi potrebbe diventare un driver cruciale per superare le ultime barriere e puntare al BIPV come valida alternativa alle soluzioni edilizie convenzionali, sia dal punto di vista costruttivo che architettonico. [84].

La sola politica dell'innovazione di prodotto non risulta tuttavia sufficiente: la complessità insita negli interventi che contemplino l'integrazione di sistemi BIPV necessita di un'assistenza da parte dei produttori che vada oltre il semplice supporto tecnico durante le operazioni di posa in opera; il prodotto chiede di arricchirsi di prestazioni ma anche di servizi, precedenti e successivi alla fase di realizzazione o dell'integrazione, instaurando rapporti fiduciari e di integrazione a monte e a valle con diversi soggetti quali fornitori, dipendenti, imprese, progettisti, installatori. Con il prodotto-servizio si prefigura un nuovo sistema di relazioni fra produttori e altri soggetti del processo edilizio, attuando accanto alla vendita dei prodotti anche la vendita di servizi e di risultati.

Per tale motivo, risulta premiante la scelta di prodotti e sistemi edilizi caratterizzati da un più alto livello di integrazione di servizi associati al prodotto; in generale, di prodotti per i quali sia in atto un passaggio di attenzione dal prodotto inteso come bene fisico ad una serie di aspetti intangibili, tra cui la creazione di rapporti fiduciari e di integrazione a monte e a valle con diversi soggetti, quali progettisti, fornitori, imprese, installatori, al fine di ottenere un maggiore valore aggiunto percepito. In particolare, sarebbe cruciale la formazione di una rete qualificata di installatori BIPV [99].

### *Dematerializzazione, integrabilità funzionale e flessibilità produttiva*

Il valore e il ruolo di maggiore conoscenza incorporata nei processi tecnologici dei sistemi BIPV si attua attraverso filiere produttive e gamme di prodotti basate sui principi di dematerializzazione, flessibilità, e alto valore aggiunto incorporato nel prodotto.

La tendenza in atto prevede che il numero delle parti che compongono un prodotto si riduca, con un aumento del numero delle funzioni svolte da ciascuna parte. La molla di questo cambiamento è il costo ambientale delle operazioni di assemblaggio, e la conseguente convenienza a produrre in un'unica operazione pezzi che integrino diversi sottocomponenti funzionali [100]. Occorre dunque promuovere l'integrabilità di più funzioni alla scala del componente edilizio, concepito in funzione di un pacchetto differenziato di prestazioni, in risposta a diverse, molteplici esigenze.

I sistemi BIPV possono essere considerati sistemi integrati perché basati su logiche spiccatamente multimateriale o multiprodotto e, frequentemente, su principi di stratificazione e integrazione specializzata di numerosi elementi. I sistemi, benché "chiusi" nell'offerta fornita dalle aziende, possono essere correlati ad altri elementi tecnici, attualizzando in tal modo i consolidati principi di una prefabbricazione aperta a catalogo, grazie alle caratteristiche di integrabilità e versatilità, diversificazione, personalizzazione, politiche della qualità e attivazione di strategie di marketing e di immagine aziendale.

I semilavorati assemblabili in "pacchetti" o sistemi sono dei prodotti flessibili e versatili, con la flessibilità che si massimizza nei termini delle molte possibilità combinatorie offerte con sistemi integrati che rappresentano la "formula" con cui essi sono commercializzati. Le prerogative della dematerializzazione introducono qualità e valore aggiunto, agendo su un uso ridotto di materiali e il crescente impiego di conoscenza incorporata sotto forma di elevate prestazioni e proprietà accanto a significativi servizi integrati al prodotto.

Processi e prodotti concepiti come BIPV offrono, con un quantitativo complessivamente minore di risorse materiali utilizzate, prestazioni superiori rispetto ai prodotti convenzionalmente impiegati per le stesse finalità. I fattori di successo di queste tecnologie sono riscontrabili nella fase di produzione, in quella di progettazione e in quella di realizzazione. In tutte le fasi si trova infatti corrispondenza fra prodotto innovativo ed esigenze degli utilizzatori finali, introducendo vantaggi reali per gli utilizzatori e marcando una superiorità tecnica dei nuovi prodotti rispetto a quelli già presenti sul mercato.

A fronte della complessità degli interventi, dovuta all'insorgere di condizioni imprevedibili legate al controllo del rapporto fra esiti energetici e risposte prestazionali, il mondo della produzione deve proporre pacchetti flessibili e soluzioni personalizzate legate alle specificità tecnologiche e morfologiche del costruito, in grado di adattarsi a diverse tipologie di edifici e contesti. Risultano favoriti i prodotti BIPV capaci di rispondere in modo specifico alle esigenze degli utilizzatori, per cui le possibili variazioni relative ad elementi costitutivi, aspetto, prestazioni, rappresentino una modalità progettabile e quindi integrata nell'offerta del prodotto.

A partire dall'osservazione che spesso non è possibile intervenire sul costruito con prodotti e moduli standard, date le molteplici esigenze specifiche variabili caso per caso, si delinea l'esigenza di selezionare prodotti caratterizzati da una minore predeterminazione formale e dalla possibilità di essere modellati "su misura", tramite una concezione di tipo *custom fit* (variazioni su prodotti standard entro range ragionevoli e poco onerosi in termini di produzione e commercializzazione), piuttosto che *on demand* (variazioni cospicue dei prodotti standard, che confluiscono in riprogettazioni ad hoc, difficilmente riproponibili successivamente in linee produttive). Linee produttive industrializzate variegata nell'offerta (nella forma, dimensioni, colori, finiture superficiali, ecc.) rappresentano un importante vantaggio competitivo per le industrie BIPV, aumentando il bacino della domanda, riducendo i tempi ed i costi di produzione e restituendo dati da test di laboratorio sulle performance energetiche dei moduli [93].

#### *Innovazione diffusa e qualità morfologica dell'integrazione*

La qualità morfologica dell'integrabilità architettonica rappresenta una delle maggiori sfide per la diffusione dei prodotti BIPV, che non sono ancora entrati a pieno titolo nel settore edile in termini di lessico, requisiti e approccio.

Per la maggior parte dei progettisti, una delle barriere alla diffusione dei BIPV è rappresentata dall'aspetto convenzionale dei pannelli fotovoltaici in silicio cristallino, tipici di un'espressione stilistica risalente ai primi anni '90, e per questo oggi considerata dai più poco attraente [99]. Per superare questo gap, l'industria fotovoltaica, già dieci anni or sono, proponeva alternative esteticamente accattivanti, come le celle colorate o le celle semitrasparenti perforate; queste ultime, a causa degli alti costi di produzione, della domanda limitata e della notevole perdita di efficienza, oggi non sono più presenti sul mercato.

Dopo gli anni caratterizzati dall'esibizione delle potenzialità espressive della tecnologia, si è assistito a una lenta ma costante inversione di tendenza, con una caduta della "rappresentazione" dell'innovazione a favore dell'esplicitazione della coerenza costruttiva, di migliori prestazioni e di innovazioni idonee alle trasformazioni in atto nel contesto ambientale e urbano. La volontà di rendere ad ogni costo manifesta la tecnologia FV ha generato anche architetture con molte zone d'ombra, cattivi funzionamenti, bassa durata e, in alcuni casi, portatrici di un'innovazione solo apparente, come se questa fosse emblematicamente registrabile per la presenza di alcuni elementi high-tech o di sistemi tecnologici all'avanguardia.

Una soluzione BIPV, per essere considerata competitiva e preferibile rispetto all'impiego di pannelli fotovoltaici di tipo convenzionale, dovrebbe oggi mostrare un aspetto totalmente divergente da questi ultimi, ma con un equiparabile rendimento energetico e con prestazioni tecnologiche simili a quelle possedute da componenti passivi per l'involucro, in termini di proprietà meccaniche, ottiche, termiche, ecc.

Dal punto di vista dell'evoluzione dell'uso del fotovoltaico negli edifici, se i pionieristici casi di utilizzo del fotovoltaico negli edifici sono stati strettamente influenzati dall'estetica del fotovoltaico finalizzato ad ottenere la massima efficienza, i recenti sviluppi tecnologici consentono una maggiore libertà progettuale, proponendo componenti BIPV per il rivestimento di facciate e coperture del tutto simili agli elementi costruttivi convenzionali.

Il ruolo del design del prodotto industriale favorisce il posizionamento competitivo di prodotti BIPV morfologicamente o esteticamente caratterizzati e costituisce un fattore di differenziazione fra vari prodotti, fra loro alternativi per piccoli dettagli legati alle texture, ai trattamenti superficiali, ai formati, ai colori, alla consistenza materica, alle possibilità combinatorie e di integrazione, alle connessioni. È interessante osservare che la tendenza al mimetismo dei materiali dell'architettura è uno dei focus principali dell'innovazione di prodotto, attraverso ad esempio trattamenti del vetro (stampa, sabbiatura, ecc.), filtri colorati e layer interposti nella stratificazione del modulo. In particolare, la diffusione sul mercato dei moduli

BIPV dalle tecnologie fotovoltaiche “invisibili” contribuisce ad accrescere l'accettazione sociale del fotovoltaico in aree sensibili, dove sono state spesso considerate antiestetiche da progettisti e utenti finali [93].

Oggi è comune rivestire l'intero involucro edilizio con soluzioni solari indipendentemente dall'orientamento, preferendo un linguaggio architettonico omogeneo alla massimizzazione della produzione di energia (rivestimento *total cladding*) [77]. È però importante osservare che la qualità del progetto e dell'integrazione ha un ruolo parimenti rilevante rispetto alla scelta dei moduli, e può essere raggiunta sia utilizzando prodotti standard che custom. Ed è altrettanto vero che i risultati ottenibili con moduli personalizzati non sono necessariamente migliori di quelli ottenuti utilizzando moduli standard. Ove possibile, e/o ove il budget non consenta di accedere a prodotti di nicchia, è preferibile ricorrere a prodotti standard o limitatamente personalizzati, impiegando gamme di produzione disponibili.

Indipendentemente dal livello di personalizzazione offerto, è importante che la scelta ricada sui moduli che presentino un migliore equilibrio tra integrazione morfologica e performance energetiche, in virtù del criterio di sfruttamento ottimizzato delle superfici dell'involucro destinate all'integrazione del fotovoltaico, ponendo particolare attenzione all'impiego di sistemi appropriati di installazione e fissaggio, in modo da soddisfare tutti i requisiti tecnologici dell'edificio [101].

#### *Efficacia dei canali di marketing, distribuzione e logistica*

Quanto in termini di tempo si risparmia nella produzione può essere perso se la distribuzione, il trasporto o gli eventuali servizi legati alle forniture diventano l'anello debole della filiera.

La scelta di ricorrere a sistemi e componenti made in Italy è senza dubbio uno dei punti chiave della strategia di diffusione dei BIPV. Quando ciò non sia possibile, ossia nel caso di prodotti scarsamente disponibili sul territorio poiché caratterizzati da un elevato livello di innovatività, occorre ricorrere a fornitori esteri specializzati; tale aspetto può incidere sull'aumento dei costi complessivi dell'intervento, rendendo incerte le tempistiche di consegna e riportando la scelta su prodotti standard o convenzionali.

Risulta opportuno dunque puntare sull'affidabilità della rete di vendita, valutando il grado di reperibilità del prodotto sul mercato e le garanzie sui tempi e sulle modalità di produzione e consegna. In questo caso spesso il *brand* gioca un ruolo importante, in quanto consente di attuare scelte affidabili e rendendo evidente ciò che il prodotto rappresenta nei confronti del mercato.

#### *Interazione intelligente con la rete*

L'integrazione energetica fa riferimento alla capacità di un impianto BIPV di interagire con il sistema energetico dell'edificio o del quartiere per massimizzare l'utilizzo in loco dell'elettricità prodotta. Riguarda quindi la gestione dell'energia, un tema destinato ad assumere sempre maggiore importanza nell'ottica di un nuovo modo di concepire l'edificio, non più come una semplice unità indipendente che ricava energia dalla rete, ma come una componente che consuma, produce, immagazzina e fornisce energia all'interno di un sistema energetico più ampio. La necessità di una generazione solare BIPV più prevedibile, gestibile, compatibile con la rete e redditizia in termini di risparmio energetico degli edifici potrebbe essere una soluzione.

#### *Il ruolo dell'informazione tecnica*

L'informazione tecnica nel campo dei BIPV ha oggi ancora molti margini di miglioramento e capillarizzazione strutturata e sviluppata per le prestazioni complessive di prodotti e sistemi che possono orientare l'operatore del settore nella valutazione e nella scelta del sistema più appropriato tra le varie tecnologie presenti sul mercato o in fase di ingresso.

La specializzazione informativa rappresenta il modo in cui i sistemi di conoscenze tecniche indirizzano le scelte delle opzioni tecniche a supporto del processo progettuale. La qualità degli interventi, infatti, va perseguita guidando la scelta tra più opzioni tecniche, riducendo i rischi tecnici in cantiere, nonché l'impatto di eventuali cambiamenti richiesti in corso d'opera.

Si evidenzia la necessità di supportare le ragioni di una scelta tecnica attraverso strumenti che ne consentano la valutazione rispetto a differenti opzioni tecnologiche, da affiancare con lo sviluppo di un'informazione

tecnica capace di evidenziare i vantaggi di natura tecnica, applicativa, progettuale, economica. La strutturazione dell'informazione tecnica e dei cataloghi di soluzioni tecniche richiede di acquisire e sistematizzare informazioni relative alle problematiche del processo edilizio (implicazioni di tipo morfologico, tecnologico, cantieristico e fra le varie fasi del processo), di quelle tecnico/costruttive e cantieristiche in relazione alle problematiche progettuali e delle condizioni di rischio tecnico e relative implicazioni sulla fase di progettazione degli interventi (Figura 40).

General aspects	PV Technological Aspects	Aesthetical Aspects	Physical and Performance Aspects	Construction Aspects	Standards Warranties
Product information and details	PV technology information	Customizability at cell scale (color, size, etc.)	Dimensional and physical aspects (size, weight, etc.)	Details for each layer of the BIPV panel (materials, performance, etc.)	Electrical standards (Low Voltage Directive)
Clear identification of the PV role in the building envelope. (Class of technical element, Technical solution, etc.)	Electrical data (power, temperature coefficients, etc.)	Customizability at module scale (layering, size, shape, color, etc.)	Thermal and hygro-metric aspects (U value, transparency, g value, thermal inertia data, airtightness, thermal bridge data, moisture control data)	Building requirements to be satisfied for the specific building skin application	Building standards to be respected for each class of requirements (safety, weather protection, energy efficiency, environmental impact, etc.) (CPR 305/2011)
Identification of building construction typologies (e.g. lightweight, massive, etc.)	Electrical aspects: solutions to integrate cabling systems, Junction box, micro-inverters, batteries, etc.	Customizability at building scale (mounting system possibilities, assemblage options, etc.)	Energetic data (e.g. PV energy potential in reference location)	Graphical analysis of technical details for the integrated solution with analysis of all the main nodes and joints, and the identification of interferences, best practice solutions	BIPV special standards
Clear drawing: e.g. exploded axonometric view, details, etc.	Indications on basic electrical installing procedures	Correlation of customizability with energetic, technological and economic aspects	Environmental features of products (e.g. embodied energy, recyclability, etc.)	Indications on building installation stages/procedures (e.g. installation guide)	Product and power warranty
Cost (investment cost, LCC)	Operation and maintenance strategies	Catalogue of possible configurations		Indication of maintenance strategies during the life-cycle (e.g. use and maintenance booklet)	Certifications, declaration of performances, labels
Digital component available (e.g. CAD, BIM objects)		Reference examples for each products			

**Figura 40. Panoramica delle possibili informazioni che potrebbero essere considerate nelle schede tecniche e nei documenti tecnici per i prodotti BIPV con lo scopo di migliorare il trasferimento del fotovoltaico nel settore edile [84].**

## 4 Repertorio di soluzioni tecniche e sperimentazione progettuale per la valutazione dell'integrabilità e dei potenziali esiti energetici di sistemi BIPV

### 4.1 Verso una progettazione multifunzionale e integrata di sistemi BIPV

Nel settore edilizio gli obiettivi di decarbonizzazione da un lato e la crescente richiesta di produzione energetica da fonti rinnovabili dall'altro, non possono che tradursi nell'uso sempre più diffuso e pervasivo di sistemi e componenti integrabili FV. Grazie al rapido progresso occorso nell'ultimo decennio nel campo della tecnologia FV, i sistemi BIPV costituiscono soluzioni architettoniche e tecnologico-costruttive di involucro multifunzionali ed efficienti, concepite sulla base di un approccio integrato che combina la minimizzazione dei fabbisogni energetici dell'edificio alla massimizzazione sia della resa da tecnologie FV, sia dell'efficienza attraverso la gestione ottimale della ventilazione, della luce naturale e, in generale, dei sistemi solari passivi.

L'integrazione di moduli o sistemi fotovoltaici negli edifici - con il ruolo di componenti edilizi - determina implicazioni non solo sulle prestazioni dell'organismo edilizio, ma anche sulla sua qualificazione spaziale e sugli esiti morfologici e linguistico-espressivi. Si tratta quindi di un'evoluzione in un ambito tecnico-produttivo che rimanda a un necessario aggiornamento del pensiero tecnico e della cultura del progetto, rivendicando la centralità e l'imprescindibilità dell'approccio tecnologico ed ambientale al progetto di architettura. Tale cambio di scenario, orientato all'innovazione e alla sperimentazione, non può prescindere da un approccio multidisciplinare, dall'ampliamento delle competenze messe in campo e da specifici approfondimenti connessi al rapporto fra modalità produttive e progetto, mettendo in evidenza il ruolo centrale rappresentato dall'adeguata diffusione di informazioni e conoscenze tra i protagonisti del processo, finalizzata alla qualità degli interventi.

Al fine di elaborare uno strumento per la conoscenza degli aspetti che determinano una corretta integrazione dei sistemi fotovoltaici con l'organismo edilizio, in questo capitolo viene definito un Repertorio di soluzioni tecniche BIPV (cfr. paragrafo 4.2). Il repertorio rappresenta una sintesi delle soluzioni maggiormente diffuse - sia per interventi ex-novo, che per interventi di retrofit - dedotte mediante un procedimento analogico riferito alla schedatura dei casi studio, all'analisi della produzione industrializzata per l'edilizia e ai sistemi e componenti BIPV catalogati. Oltre alle possibili categorie di applicazione delle soluzioni BIPV analizzate, per meglio comprendere la multifunzionalità di sistemi e componenti, vengono esplicitati i requisiti tecnologici connotanti a cui viene garantita una risposta (resistenza meccanica, ventilazione naturale, tenuta dell'acqua, controllo del fattore solare, ecc.). Le soluzioni tecniche rimandano, inoltre, alle *Schede prodotto* e alle *Schede casi studio* presenti nei Cataloghi elaborate al fine di restituire - anche in termini di integrazione architettonica - un riferimento sui possibili esiti morfologici e linguistico-espressivi.

Le soluzioni tecniche individuate sono successivamente testate in una sperimentazione progettuale su un set di edifici campione individuati nell'ambito della città metropolitana di Napoli. La sperimentazione si è concentrata prevalentemente sull'edilizia residenziale esistente, la più diffusa in ambito nazionale - con quasi 32 milioni di abitazioni - e caratterizzata da elevati emissioni di CO<sub>2</sub> e consumi energetici. Tale condizione è determinata dal fatto che oltre il 65% di tale parco edilizio ha più di 45 anni, ovvero è precedente alla legge n. 373 del 1976, prima legge sul risparmio energetico. Di questi edifici, oltre il 25% registra consumi annuali da un minimo di 160 kWh/m<sup>2</sup> anno a oltre 220 kWh/m<sup>2</sup>. La crescente importanza del fenomeno di povertà energetica, inoltre, rende di interesse un focus sulle abitazioni in edilizia residenziale pubblica (abitazioni di proprietà o gestite dalle aziende ex IACP), che in Italia sono poco più di 710.000 [102]. Per tali premesse la scelta dei casi applicativi è ricaduta principalmente sull'edilizia residenziale pubblica e su alcuni ulteriori specifici casi al fine di testare differenti scenari di intervento rispetto a: orientamento, tipo di tessuto urbano, caratteri tipo-morfologici e valenza architettonica. L'obiettivo della sperimentazione progettuale è quello di simulare gli esiti energetici derivanti dall'integrazione di sistemi BIPV nelle condizioni contestuali e architettoniche maggiormente ricorrenti in ambito urbano, identificando le soluzioni progettuali e tecnologiche più appropriate e potenzialmente replicabili in scenari analoghi.

Nell'ultima parte del capitolo, infine, viene definito un set di indicatori utili allo sviluppo del progetto nella valutazione delle precondizioni e prefigurazioni di soluzioni integrate BIPV. Il set di indicatori sviluppato intende costituire uno strumento di supporto alla progettazione di sistemi BIPV a scala nazionale, definendo soglie qualitative e quantitative per comprendere, rispetto alle condizioni contestuali e tipo-morfologiche, i possibili esiti energetici derivanti dall'impiego di componenti architettonici BIPV.

#### 4.2 Definizione di un Repertorio di soluzioni tecniche per l'integrazione dei BIPV

Al fine di analizzare gli aspetti che determinano una corretta integrazione del sistema fotovoltaico con l'organismo edilizio, si è proceduto alla definizione di un Repertorio delle principali soluzioni tecniche BIPV per il progetto di architettura, desunte prevalentemente dalla letteratura tecnico-scientifica (capitolo 2), dall'analisi della produzione industrializzata per l'edilizia e dagli esempi progettuali (capitolo 3).

L'obiettivo della presente schedatura è individuare e descrivere le soluzioni ricorrenti di maggiore efficacia in relazione ai diversi sistemi e componenti dell'involucro edilizio, potenzialmente replicabili e adattabili al contesto d'intervento italiano, definendo così un apparato conoscitivo utile per l'integrazione dei BIPV, che indirizzi i progettisti verso la selezione delle opzioni tecnologiche più appropriate caso per caso.

Come già esplicitato nel capitolo 3 (paragrafo 3.4), per ciascuna delle macrocategorie funzionali denominate *Unità Tecnologiche* (Copertura, Facciata, Dispositivi Esterni Integrati) si individuano le parti costitutive del sistema tecnologico (*Classi di Elementi Tecnici*), per cui sono identificate univocamente le soluzioni tecniche conformi di riferimento (Tabella 13)<sup>35</sup>.

**Tabella 13. Rappresentazione schematica dell'organismo edilizio con elenco e individuazione delle soluzioni tecniche BIPV relate alle Classi di Elementi Tecnici.**

<b>C1</b>	Copertura discontinua	
<b>C2a</b>	Copertura continua non praticabile	
<b>C2b</b>	Copertura continua praticabile	
<b>C3</b>	Copertura vetrata / atrio / lucernario	
<b>F1</b>	Facciata continua	
<b>F2</b>	Facciata ventilata	
<b>F3</b>	Facciata a doppia pelle	
<b>F4</b>	Serramento	
<b>D1</b>	Parapetto / coronamento	
<b>D2</b>	Frangisole	
<b>D3</b>	Pensilina / tettoia/ pergola	

La schedatura delle soluzioni tecniche è tesa a fornire un quadro sintetico di informazioni utili alla conoscenza delle principali caratteristiche tecnologiche delle applicazioni di prodotti e sistemi BIPV all'interno di organismi edilizi, mediante l'illustrazione delle specifiche caratteristiche funzionali delle diverse alternative tecniche proposte, al fine di garantire che le prestazioni del manufatto siano rispondenti al quadro esigenziale espresso in fase meta-progettuale.

Le soluzioni riportate sono state elaborate privilegiando quelle diffuse nella prassi costruttiva corrente, escludendo quelle non sufficientemente consolidate o riscontrabili saltuariamente.

La posa in opera dei moduli fotovoltaici presenta problematiche del tutto analoghe a quelle poste dalla giunzione di componenti tradizionali e le modalità di connessione ai supporti e alle sottostrutture prevedono soluzioni analoghe a quelle adottate per i sistemi e componenti edili di tipo passivo [83].

Indipendentemente dalla soluzione analizzata, il requisito di integrabilità costruttiva fra elementi e parti del sistema BIPV deve essere garantito dalla coordinazione di dimensioni e di interfaccia, prevedendo adeguate

<sup>35</sup> Le soluzioni conformi rientrano fra quegli strumenti normativi che, sottoforma di repertori - raccolte sistematiche di particolari costruttivi, descrivono soluzioni costruttive e architettoniche che nel complesso forniscono una soddisfacente risposta alla richiesta di determinate prestazioni. Le soluzioni conformi possono inoltre fungere da guida per la formulazione di capitolati qualora si intenda indirizzare l'offerta progettuale verso soluzioni tecniche preferenziali.

tolleranze e specifiche modalità di collegamento, con la previsione in fase di progetto ad accogliere le predisposizioni impiantistiche necessarie al corretto funzionamento del sistema, prevedendo di poter accedere alle scatole di giunzione e al cablaggio dei moduli, senza particolari difficoltà per la manutenzione [103]. Il GSE sottolinea l'importanza di studiare sistemi specifici per il raggruppamento e occultamento dei collegamenti elettrici nonché di progettare con cura gli elementi di collegamento tra l'impianto fotovoltaico e gli altri elementi edilizi al fine di non compromettere la funzionalità dell'edificio [20].

Le schede sono articolate in blocchi di informazioni uniformi e ricorrenti, che riguardano aspetti e problematiche comuni a tutte le soluzioni individuate.

- *Caratteristiche generali.* Si riporta la descrizione della soluzione tecnica dal punto di vista tecnico-realizzativo, con sintetiche informazioni circa la corretta posa in opera, precedute dall'indicazione della categoria di applicazione secondo lo standard di riferimento IEC 63092-1:2020 (cfr. Tabella 1); a seguire si riportano i requisiti tecnologici connotanti (cfr. Tabella 4).
- *Grafici di dettaglio.* Si riportano elaborati grafici rappresentativi di soluzioni generiche rispetto alle molteplici soluzioni analizzate nei casi studio, nodi di connessione con esplicitazione degli strati funzionali che compongono ciascuna soluzione (evidenziati in rosso) nell'ambito del manufatto architettonico; tali grafici non forniscono indicazioni sui materiali che compongono gli strati funzionali né sulle caratteristiche dimensionali, che richiedono di essere definiti in sede di progetto di specifiche soluzioni progettuali realizzate per idonei contesti.
- *Sistemi e moduli BIPV di uso ricorrente.* Si illustra la correlazione della soluzione tecnica con la produzione industrializzata per l'edilizia; per ogni soluzione tecnica si individuano una o più tipologie di moduli e sistemi BIPV di uso corrente che il progettista potrà adottare, indicandone le principali caratteristiche tecnologiche (trasparenza, planarità, rigidità e isolamento), senza tuttavia dare alcuna indicazione in merito alle specifiche di natura morfologica o energetica, dipendendo queste ultime da esigenze progettuali variabili caso per caso, e dunque non generalizzabili; per ciascuna soluzione si fa riferimento, a titolo esemplificativo, a prodotti BIPV presenti sul mercato e contenuti nel catalogo di schede prodotto (cfr. *Catalogo di prodotti BIPV* in Appendice 1).
- *Esempi di applicazioni.* Sezione dedicata alle applicazioni progettuali esemplificative delle soluzioni descritte, con immagini desunte prevalentemente dai casi studio analizzati nel capitolo 3 (cfr. *Cataloghi di casi di successo e buone pratiche BIPV*, in Appendice 2 e 3).

Il *Repertorio di soluzioni tecniche BIPV* è riportato in Appendice 4. A titolo esemplificativo si riporta di seguito una scheda tipo.



### 4.3 *Sperimentazione progettuale su un campione di edifici di edilizia residenziale: metodologia e fasi*

Nell'ambito della ricerca è stata condotta un'attività di sperimentazione progettuale nella quale le soluzioni tecniche del Repertorio sono state applicate su un campione di edifici residenziali esistenti al fine di simularne gli esiti energetici rispetto a condizioni specifiche di contesto.

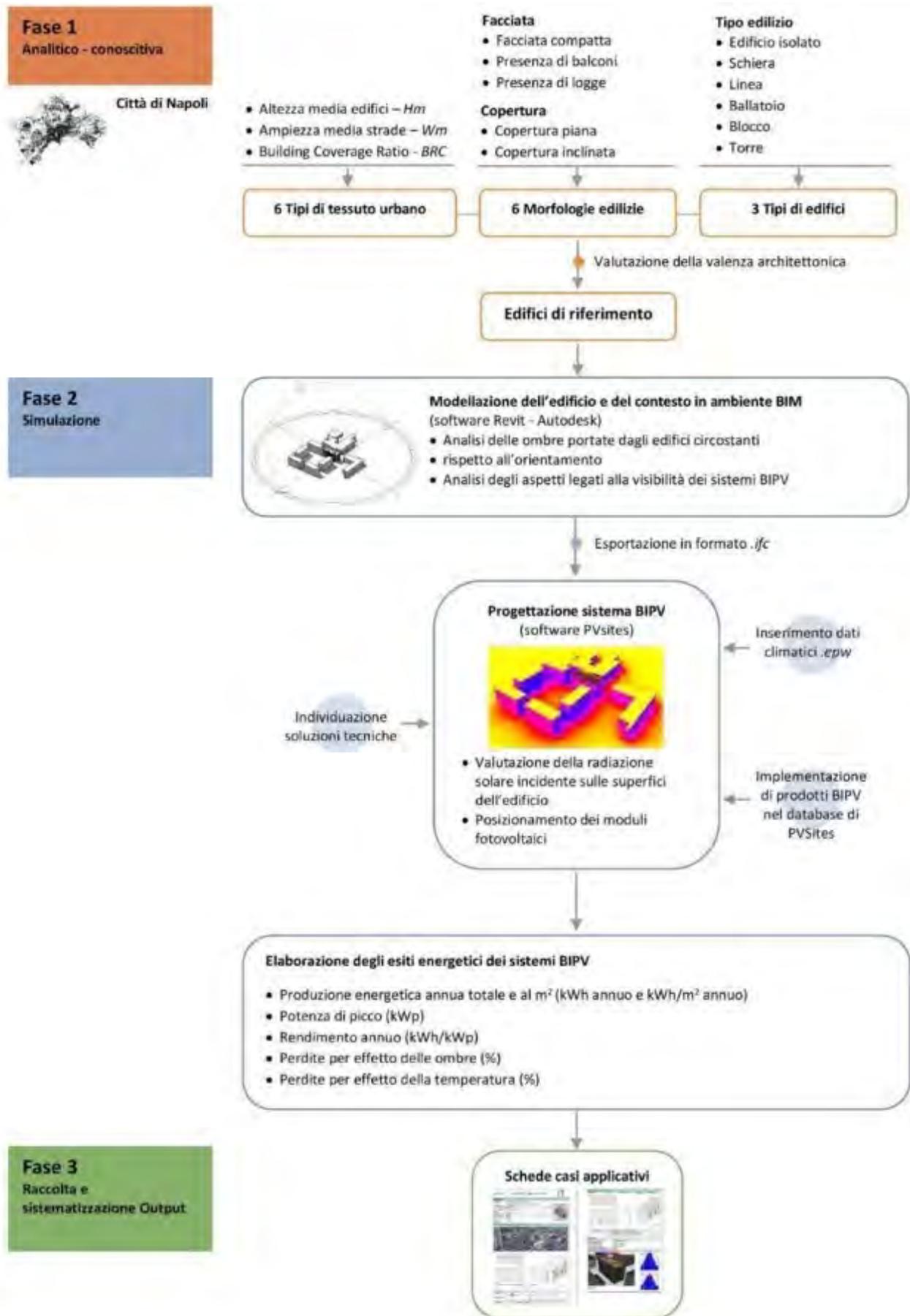
La sperimentazione progettuale adotta un approccio metodologico in 3 fasi - analitico-conoscitiva, di simulazione, di raccolta e sistematizzazione degli output - finalizzato a valutare le opportunità di integrazione di sistemi BIPV su un set di edifici di riferimento della città di Napoli e a stimarne il potenziale energetico. Nella fase analitico-conoscitiva vengono presi in considerazione gli aspetti legati al contesto di riferimento, quelli tipo-morfologici e quelli relativi ai diversi livelli di valenza architettonica rilevati al fine di individuare un set di edifici campione rappresentativo delle condizioni e i contesti maggiormente rilevabili in ambito urbano su scala nazionale. L'analisi dei tessuti urbani - condotta attraverso l'indicatore di morfologia urbana - e quella delle caratteristiche morfologiche degli edifici ricorrenti va a indagare i fattori che incideranno sulla quantità delle superfici appropriate all'installazione di sistemi BIPV. Se da un lato, infatti, il contesto si rileva determinante per la quantificazione delle ombre portate sulle superfici dell'involucro, la presenza di elementi aggettanti, rientranze o sporgenze (quali balconi, ballatoi o logge) genererà ombre proprie sui sistemi BIPV installati. Rispetto alle differenti casistiche rilevate sono quindi definiti sei tipi di tessuto urbano e sei morfologie edilizie prevalenti. Sono inoltre individuati tre tipi di edifici rispetto ai rapporti dimensionali prevalenti che legano lo sviluppo del fabbricato lungo le tre dimensioni di lunghezza, altezza e larghezza. Gli edifici campione sono quindi scelti in modo da essere rappresentativi di una sufficiente combinazione di condizioni contestuali e tipo-morfologiche, tenendo anche in considerazione dei diversi livelli di valenza architettonica riscontrabili e rispetto ai quali intervenire - al fine di non alterare eventuali caratteri architettonici originari di rilievo - con strategie di *deep* o *light* retrofit. Nella successiva fase di simulazione, la modellazione BIM (*Building Information Modelling*) affiancata dal tool open source e interoperabile PVSites, per la stima delle caratteristiche energetiche di un sistema fotovoltaico integrato, ha consentito di individuare le superfici più appropriate per l'integrazione BIPV, rispetto non solo alla potenziale produzione energetica, ma anche agli esiti spaziali, morfologici e linguistico-espressivi.

Nel dettaglio il processo di simulazione può essere riassunto attraverso i seguenti step:

- modellazione BIM (software Autodesk Revit);
- analisi delle ombre portate rispetto al contesto (Autodesk Revit plugin Insight - Solar Analysis);
- analisi degli aspetti legati alla visibilità dei sistemi BIPV valutando l'indicatore di morfologia urbana;
- esportazione in formato *.ifc* e importazione nel software PVSites (CADCAMation);
- inserimento dei dati climatici della città di Napoli (*EnergyPlus weather file .epw*);
- valutazione della radiazione solare incidente sulle superfici e delle soluzioni tecniche BIPV integrabili;
- eventuale implementazione di prodotti BIPV nel database PVSites;
- posizionamento dei moduli e dimensionamento del sistema BIPV e selezione di inverter e cablaggio;
- elaborazione ed estrazione degli esiti energetici dei sistemi BIPV: produzione energetica annua totale e al  $m^2$  (kWh annuo e kWh/ $m^2$  annuo); potenza di picco (kWp); rendimento annuo (kWh/kWp).

La raccolta e sistematizzazione degli output ha portato, infine, all'elaborazione di n. 13 schede sintetiche (cfr. Schede di simulazione di BIPV su casi applicativi in Appendice) che raccolgono le informazioni relative ai casi applicativi, agli esiti energetici dei sistemi BIPV simulati e alle specifiche soluzioni tecniche adottate.

Nei paragrafi che seguono vengono esplicitati i criteri analizzati che hanno portato alla selezione dei casi applicativi e viene raccontata nel dettaglio la struttura delle schede sintetiche.



#### 4.3.1 Il contesto di riferimento: la città metropolitana di Napoli

La sperimentazione ha come campo di indagine la città di Napoli che, per la particolare evoluzione storica, offre la possibilità di individuare tessuti urbani eterogenei e rilevabili in modo comparabile sul territorio nazionale. Dalla catalogazione dei casi studio (cfr. Appendici 2 e 3), si riscontra ancora un moderato utilizzo di soluzioni fotovoltaiche integrate nell'edilizia del centro-sud Italia, quindi un'analisi delle potenzialità energetiche e progettuali in questo contesto, diventa un'occasione per contribuire a una maggior diffusione dei sistemi BIPV. D'altro canto, l'elevata disponibilità e accessibilità di dati relativi all'intero territorio napoletano risulta essere un fattore determinante nella scelta di tale contesto.

La determinazione dei tessuti urbani ricorrenti è stata effettuata analizzando sia il periodo storico di sviluppo, sia le specifiche caratteristiche spaziali attraverso il calcolo dell'indice di morfologia urbana U (68). L'indice U tiene conto del rapporto di copertura al suolo (BCR), dell'ampiezza media delle strade (Wm) e dell'altezza media degli edifici (Hm) di un determinato contesto ( $U = BCR \cdot Hm / Wm$ ). Le aree analizzate hanno superficie pari a 250.000 m<sup>2</sup> (500 x 500 m), dimensione sufficientemente ampia da includere diverse tipologie edilizie e valutare in modo coerente la consistenza del tessuto urbano (Figura 41).

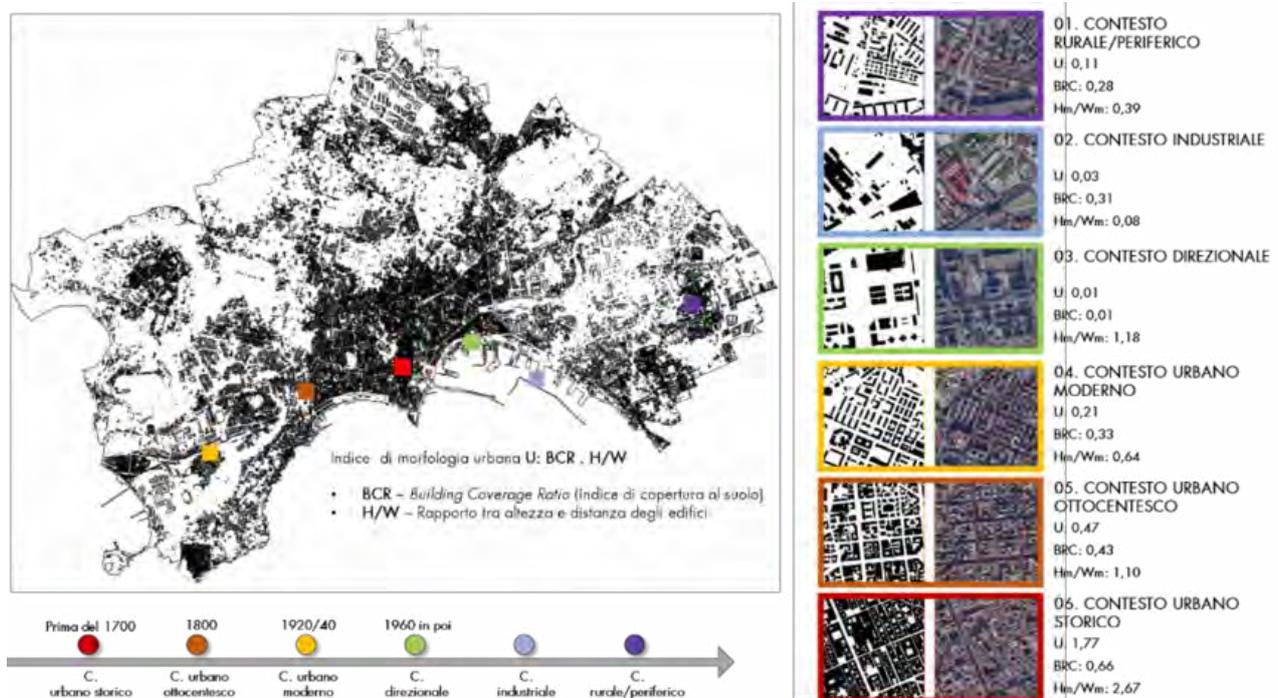


Figura 41. Analisi del contesto di alcune aree della città di Napoli e individuazione dell'indice di morfologia urbana.

Rispetto allo specifico campo di indagine, sono quindi classificati i seguenti tessuti:

- contesto urbano storico, ante 1700, caratterizzato da un rapporto di copertura al suolo elevato, maglie stradali irregolari e di ridotta ampiezza, edifici di altezza media;
- contesto urbano ottocentesco, sviluppatosi tra il 1700 e 1800, caratterizzato da un rapporto di copertura al suolo medio-elevato, maglie stradali regolari abbastanza ampie a formare lotti quadrati o rettangolari ed edifici di altezza media;
- contesto urbano moderno, formatosi tra il 1920 e 1960, caratterizzato da un rapporto di copertura al suolo medio, maglie stradali regolari e ampie a formare lotti quadrati o rettangolari con edifici di altezza media;
- contesto direzionale, sviluppatosi dopo il 1960, caratterizzato da un rapporto di copertura al suolo basso, maglie stradali e distanze tra gli edifici molto ampie con altezze molto elevate;
- contesto industriale, sviluppatosi dopo il 1960, caratterizzato da un rapporto di copertura al suolo medio, maglie stradali irregolari e distanze tra gli edifici molto ampie e altezze molto basse;

- contesto rurale/periferico, sviluppatosi dopo il 1960, caratterizzato da un rapporto di copertura al suolo medio-basso, maglie stradali irregolari, ma con distanze tra gli edifici abbastanza ampie e altezze basse.

Analizzando per ogni tipo di tessuto il relativo indice di morfologia urbana (U), adottando un approccio di tipo induttivo è stato possibile ricavare delle soglie di valori entro cui individuare univocamente i contesti di riferimento (Tabella 14). L'analisi del tessuto urbano risulta necessaria per comprendere gli effetti del contesto e, in particolare, rispetto alla proiezione di ombre portate, che incide a sua volta sulla riduzione della radiazione solare del sistema BIPV degli edifici di riferimento.

**Tabella 14. Individuazione di sei possibili contesti, classificati in base alla morfologia urbana.**

Hm/Wm	BCR				
	<0,1	0,1÷0,3	0,3÷0,4	0,4÷0,6	> 0,6
<0,5		<b>01.</b> Contesto rurale/ periferico $U < 0,15$	<b>02.</b> Contesto industriale $0,03 < U < 0,2$		
0,5÷1,0	<b>03.</b> Contesto direzionale $U < 0,2$		<b>04.</b> Contesto urbano moderno $0,15 < U < 0,4$		
1,0÷2,0				<b>05.</b> Contesto urbano ottocentesco $0,4 < U < 1,2$	
>2					<b>06.</b> Contesto urbano storico $U > 1,2$

#### 4.3.2 Morfologia e tipi di edifici

Le caratteristiche morfologiche, determinando possibili ombre proprie sull'involucro, incidono al pari delle condizioni contestuali sul rendimento di un sistema BIPV (cfr. paragrafo 2.4). Sono stati quindi individuati sei tipi di morfologie ricorrenti degli edifici considerando le più comuni soluzioni architettoniche delle facciate e delle coperture. In presenza di edifici che presentino più di una morfologia tra quelle individuate, viene presa in considerazione quella prevalente in termini di superficie (Tabella 15).

**Tabella 15. Individuazione di sei tipi di morfologie ricorrenti.**

Morfologia coperture	Morfologia facciate		
	1. Forma compatta senza sporti né aggetti, priva di spazi esterni	2. Presenza di balconi/ ballatoi/ sporgenze/ volumi aggettanti/ verande	3. Presenza di logge/ ballatoi/ rientranze/ verande
A. copertura piana	<b>A1</b> 	<b>A2</b> 	<b>A3</b> 
B. copertura inclinata	<b>B1</b> 	<b>B2</b> 	<b>B3</b> 

Al fine di definire in modo univoco gli elementi ricorrenti delle facciate, si riporta di seguito un breve glossario tecnico di riferimento con le definizioni desunte dal *Regolamento Edilizio Tipo*<sup>36</sup>, valido sull'intero territorio italiano:

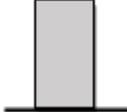
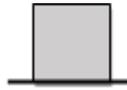
<sup>36</sup> L'adozione del Regolamento Edilizio Tipo (RET), prevista dall'Intesa raggiunta il 20/10/2016 tra Stato, Regioni e ANCI (G.U. n. 268 del 16/11/16), rappresenta una delle azioni di semplificazione e unificazione in materie edilizie promosse dal Governo.

- balcone: elemento edilizio praticabile e aperto su almeno due lati, a sviluppo orizzontale in aggetto, munito di ringhiera o parapetto e direttamente accessibile da uno o più locali interni.
- ballatoio: elemento edilizio praticabile a sviluppo orizzontale, e anche in aggetto, che si sviluppa lungo il perimetro di una muratura con funzione di distribuzione, munito di ringhiera o parapetto.
- loggia o loggiato: elemento edilizio praticabile coperto, non aggettante, aperto su almeno un fronte, munito di ringhiera o parapetto, direttamente accessibile da uno o più vani interni.
- veranda: locale o spazio coperto avente le caratteristiche di loggiato, balcone, terrazza o portico, chiuso sui lati da superfici vetrate o con elementi trasparenti e impermeabili, parzialmente o totalmente apribili.

Oltre alle morfologie ricorrenti, sono stati individuati tre tipi di edifici rispetto ai rapporti dimensionali prevalenti che legano lo sviluppo dei fabbricati lungo le tre dimensioni: lunghezza, altezza e larghezza (Tabella 16), e sono:

- tipo 01: edifici che si sviluppano prevalentemente in lunghezza;
- tipo 02: edifici che si sviluppano prevalentemente in altezza;
- tipo 03: edifici irregolari che non presentano una direzione principale di sviluppo.

**Tabella 16. Individuazione dei tre possibili tipi di edifici in relazione ai rapporti dimensionali.**

Tipi di edifici		
01	02	03
		

Nella definizione dei tipi di edifici, oltre ai rapporti dimensionali, sono stati analizzati i tipi edilizi residenziali maggiormente diffusi sul territorio nazionale. È stata quindi verificata la riconducibilità dei tipi edilizi residenziali ai tre tipi di edifici individuati (01 – 02 – 03).

Secondo tale semplificazione, all'interno del *tipo 01* possono ricadere i tipi edilizi della linea, del ballatoio e delle case a schiera, per il *tipo 02* è possibile individuare il tipo edilizio a torre, mentre, per il *tipo 03* i tipi edilizi isolato e blocco.

Di seguito una breve descrizione dei tipi edilizi (Tabella 17).

**Tabella 17. Individuazione dei tipi edilizi residenziali.**

Tipo edilizio	Descrizione	Affacci	Piani
<b>01. isolato</b> 	Presente prevalentemente in aree rurali o periferiche a bassa densità abitativa, con maggiore disponibilità di terreno libero; singolo corpo edilizio organizzato liberamente su un lotto, con aggregazione di 1/2 unità abitative; accesso/i indipendente/i da fronte stradale; ampio spazio di pertinenza aperto trattato a verde; eventuale vano scala interno all'alloggio.	3 - 4 lati	1 - 2
<b>02. schiera</b> 	Presente prevalentemente in aree periferiche a bassa/media densità abitativa; corpo edilizio organizzato come aggregazione di almeno 3 unità abitative in successione lineare, con condivisione dei setti portanti trasversali; accesso indipendente da fronte stradale; spazio aperto di pertinenza anteriore e posteriore; vano scala interno all'alloggio.	2 lati	2 - 3

Tipo edilizio	Descrizione	Affacci	Piani
<b>03. linea</b> 	Presente sia nei centri urbani a media o alta densità abitativa che nelle aree periferiche per la formazione di isolati dai fronti continui; corpo edilizio generalmente ad impianto rettangolare, organizzato come aggregazione lineare di almeno 2 unità abitative; piano terra adibito a magazzino o negozio; vano scala distribuisce 2 o più alloggi per piano.	2 - 3 lati	≥ 3
<b>04. ballatoio</b> 	Presente prevalentemente in aree urbane centrali o periferiche per la formazione di isolati dai fronti continui; corpo edilizio generalmente ad impianto rettangolare, organizzato come aggregazione di almeno 3 unità abitative in successione lineare, con condivisione dei setti portanti trasversali; ballatoio aperto o chiuso, esterno o interno; vani scala (alle estremità) servono un percorso lineare tramite il quale si accede agli alloggi.	2 lati	≥ 3
<b>05. blocco</b> 	Presente prevalentemente nei centri urbani a media/alta densità abitativa, si adatta bene alla conformazione irregolare dei lotti; corpo edilizio complesso, generalmente ad impianto più tozzo rispetto al tipo in linea ma meno elevato rispetto al tipo a torre; piano terra a destinazione commerciale o terziaria; presenza di giardini e spazi aperti; presenza di più vani scala, soluzioni d'angolo complesse e una maggiore articolazione dei fronti soleggiati.	2 - 3 lati	≥ 4
<b>06. torre</b> 	Presente prevalentemente nei centri urbani ad alta densità abitativa di recente formazione, per la capacità di organizzare un gran numero di alloggi; corpo edilizio isolato di altezza consistente, generalmente ad impianto quadrangolare; solitamente circondato da spazi aperti e svincolato rispetto all'asse viario, disposto sul limite delle aree edificate; il vano scala, generalmente centrale, può essere chiuso (con aerazione forzata) o con aperture verso l'esterno.	2 lati	≥ 6

#### 4.3.3 Selezione dei casi applicativi

La selezione dei casi applicativi si è concentrata nell'ambito della città metropolitana di Napoli rispetto ai criteri definiti nei paragrafi precedenti. Con l'obiettivo di analizzare casi potenzialmente replicabili sul territorio nazionale ed edifici in cui sia possibile massimizzare le superfici da destinare a sistemi BIPV, la sperimentazione si è concentrata su edifici residenziali in contesti o aggregati urbani in cui non siano presenti vincoli. In alcuni casi specifici (cfr. Appendice 5, Schede di simulazione di BIPV su casi applicativi Palazzo Gravina 06.B1.03 e Torre 04.A2.02), la sperimentazione ha indagato la possibilità di integrare soluzioni BIPV anche su edifici caratterizzati da una certa valenza architettonica o in caso di edifici e contesti vincolati; si tratta di una condizione frequentemente rilevabile nel contesto nazionale e rispetto alla quale si ritiene necessario sperimentare opportunità di integrazione di sistemi fotovoltaici, seppur limitata ad aree scarsamente visibili o a soluzioni BIPV 'non riconoscibili' al fine di non alterarne la valenza architettonica.

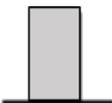
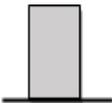
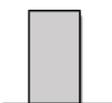
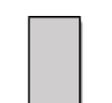
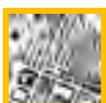
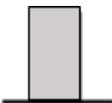
Nella selezione dei casi applicativi sono state effettuate alcune semplificazioni rispetto ai tipi di tessuto urbano identificati: è possibile, infatti, associare - rispetto all'indice di morfologia urbana e ai dati sulla produzione energetica - le caratteristiche di alcuni tipi di tessuto. In particolare, possono essere accomunati il tessuto 01 - *Contesto rurale/periferico* e quello 02 - *Contesto industriale*, così come il tessuto 04 - *Contesto urbano moderno* e quello 05 - *Contesto urbano ottocentesco*, possono essere considerati analoghi in relazione alla valutazione della potenziale produzione energetica da BIPV.

Anche l'orientamento degli edifici è stato considerato un fattore determinante nella selezione dei casi applicativi, analizzando talvolta nello stesso contesto più opzioni di orientamento.

Dalla combinazione delle caratteristiche relative a tessuti urbani, tipi di edifici, morfologie edilizie, valenza architettonica e orientamento sono stati individuati n. 13 edifici di riferimento, classificati nella seguente tabella (Tabella 18).

**Tabella 18. Individuazione e classificazione dei tipi Casi Applicativi.**

Casi applicativi	Contesto	Morfologia	Tipo edificio	Orientamento	Edificio
<p><b>1</b></p> 	<p><b>01</b></p>  <p>C. rurale/periferico</p>	<p><b>A3</b></p>  <p>Logge C. piana</p>	<p><b>01</b></p>  <p>Sviluppo prevalente in lunghezza</p>	<p>Fronti principali E-O</p> <p>Fronti secondari N-S</p>	<p>Autore: Luigi Cosenza</p> <p>Localizzazione: Rione Luzzatti – Poggioreale, Napoli</p>
<p><b>2</b></p> 	<p><b>01</b></p>  <p>C. rurale/periferico</p>	<p><b>A3</b></p>  <p>Logge C. piana</p>	<p><b>01</b></p>  <p>Sviluppo prevalente in lunghezza</p>	<p>Fronti principali NO-SE</p> <p>Fronti secondari NE-SO</p>	<p>Autore: Luigi Cosenza</p> <p>Localizzazione: Rione Cesare Battisti – Poggioreale, Napoli</p>
<p><b>3</b></p> 	<p><b>01</b></p>  <p>C. rurale/periferico</p>	<p><b>A3</b></p>  <p>Logge C. piana</p>	<p><b>01</b></p>  <p>Sviluppo prevalente in lunghezza</p>	<p>Fronti principali E-O</p> <p>Fronti secondari N-S</p>	<p>Autore: Eirene Sbriziolo</p> <p>Localizzazione: Via Campegna - Fuorigrotta, Napoli</p>
<p><b>4</b></p> 	<p><b>04</b></p>  <p>C. urbano moderno</p>	<p><b>A2</b></p>  <p>Balconi C. piana</p>	<p><b>01</b></p>  <p>Sviluppo prevalente in lunghezza</p>	<p>Fronti principali NO-SE</p> <p>Fronti secondari NE-SO</p>	<p>Autore: Luigi Cosenza</p> <p>Localizzazione: Via Consalvo -Fuorigrotta, Napoli</p>
<p><b>5</b></p> 	<p><b>04</b></p>  <p>C. urbano moderno</p>	<p><b>A2</b></p>  <p>Balconi C. piana</p>	<p><b>01</b></p>  <p>Sviluppo prevalente in lunghezza</p>	<p>Fronti principali NE-SO</p> <p>Fronti secondari NO-SE</p>	<p>Autore: /</p> <p>Localizzazione: Fuorigrotta – Cavalleggeri d'Aosta, Napoli</p>

Casi applicativi	Contesto	Morfologia	Tipo edificio	Orientamento	Edificio
<p>6</p> 	<p>04</p>  <p>C. urbano moderno</p>	<p>A3</p>  <p>Logge C. piana</p>	<p>01</p>  <p>Sviluppo prevalente in lunghezza</p>	<p>Fronti principali N-S Fronti secondari E-S</p>	<p>Autore: Luigi Cosenza - IACP</p> <p>Localizzazione: Rione D’Azeglio - Barra, Napoli</p>
<p>7</p> 	<p>01</p>  <p>C. rurale/periferico</p>	<p>A3</p>  <p>Logge C. piana</p>	<p>02</p>  <p>Sviluppo prevalente in altezza</p>	<p>Fronti principali NO-SE Fronti secondari NE-SO</p>	<p>Autore: Riccardo Dalisi -PSER</p> <p>Localizzazione: Ponticelli, Napoli</p>
<p>8</p> 	<p>01</p>  <p>C. rurale/periferico</p>	<p>A2</p>  <p>Balconi C. piana</p>	<p>02</p>  <p>Sviluppo prevalente in altezza</p>	<p>Fronti principali N-S E-O</p>	<p>Autore: Luigi Cosenza</p> <p>Localizzazione: Rione Cesare Battisti – Poggioreale, Napoli</p>
<p>9</p> 	<p>03</p>  <p>C. direzionale</p>	<p>A2</p>  <p>Balconi C. piana</p>	<p>02</p>  <p>Sviluppo prevalente in altezza</p>	<p>Fronti principali NO-SE NE-SO</p>	<p>Autore: Lorenzo Morando</p> <p>Localizzazione: Isola C7 - Centro Direzionale, Napoli</p>
<p>10</p> 	<p>03</p>  <p>C. direzionale</p>	<p>A1</p>  <p>Forma compatta C. piana</p>	<p>02</p>  <p>Sviluppo prevalente in altezza</p>	<p>Fronti principali NO-SE NE-SO</p>	<p>Autore: /</p> <p>Localizzazione: Isola A5 - Centro Direzionale, Napoli</p>
<p>11</p> 	<p>04</p> 	<p>A2</p> 	<p>02</p> 	<p>Fronti principali NE-SO Fronti secondari NO-SE</p>	<p>Autore: Mario Ridolfi - INA</p>

Casi applicativi	Contesto	Morfologia	Tipo edificio	Orientamento	Edificio
Casi applicativi	Contesto	Morfologia	Tipo edificio	Orientamento	Edificio
<b>12</b> 	<b>04</b>  C. urbano moderno	<b>A2</b>  Balconi C. piana	<b>03</b>  Nessuna direzione di sviluppo prevalente	Fronti principali NE-SO Fronti secondari NO-SE	Autore: / Localizzazione: Fuorigrotta – Cavalleggeri d'Aosta, Napoli
<b>13</b> 	<b>06</b>  C. urbano storico	<b>B1</b>  Forma compatta, C. inclinata	<b>03</b>  Nessuna direzione di sviluppo prevalente	Fronti principali NE-SO Fronti secondari NO-SE	Autore: Gabriele d'Agnolo Localizzazione: Via Monteoliveto, Napoli

#### 4.3.4 Struttura e descrizione della schedatura dei casi applicativi

Le schede dei casi applicativi sono articolate in sezioni informative uniformi, per consentire una facile lettura comparata dei dati energetici ottenuti in relazione ai diversi indicatori precedentemente trattati. Le integrazioni di sistemi BIPV sono progettate con l'obiettivo di massimizzare la produzione energetica e considerando l'influenza degli aspetti ambientali e tipo-morfologici. Ciò permette di ottenere un repertorio di test applicativi che consentono di orientare la progettazione in relazione ai tipi di tessuti urbani e di edificio o alla morfologia rilevata.

Ciascuna scheda è identificata con un codice alfanumerico riferito alla simulazione (SM) e al tipo di tessuto, alla morfologia dell'edificio e al tipo di edificio.

##### *Dati di base*

Al primo blocco informativo appartengono i dati relativi al manufatto architettonico, ossia la localizzazione (con la posizione geografica fornita dalle coordinate di *latitudine* e *longitudine*), la *destinazione d'uso*, l'*epoca di costruzione*, il *numero di piani*, la *superficie coperta*, l'*altezza dell'edificio* e l'*aggregazione planimetrica*.

##### *Aspetti ambientali e tipo-morfologici relativi all'edificio e al contesto*

Nella sezione vengono descritte le caratteristiche ambientali del contesto e tipo-morfologiche che influiscono sulla potenziale producibilità energetica dei sistemi BIPV di intervento. Si avranno quindi indicazioni relative a:

- orientamento: N-S (nord-sud), NE-SO (nordest-sudovest), NO-SE (nordovest-sudest), EO (est-ovest) dell'edificio;
- tipo di tessuto urbano;
- morfologia dell'edificio;
- tipo di edificio.

Si riportano, inoltre, i grafici architettonici più significativi per la progettazione di sistemi BIPV (*pianta delle coperture*, *prospetti* e *viste assonometriche*) dell'edificio considerato.

##### *Descrizione del Sistema BIPV*

La sezione descrive sinteticamente le scelte progettuali adottate per l'installazione di sistemi fotovoltaici integrati con l'individuazione del tipo di retrofit tecnologico distinto in *addizione*, *sostituzione* e *recladding*. Gli esiti energetici vengono descritti in relazione alle singole soluzioni tecniche scelte (cfr. paragrafo 4.2) e rispetto alla produzione totale, presentando con grafici schematici le soluzioni progettuali adottate. Gli esiti energetici delle singole soluzioni tecniche sono specificati in relazione a *orientamento/azimut* e *inclinazione/tilt*.

#### *Dati energetici*

In questa sezione, rispetto a ogni soluzione tecnica BIPV adottata, vengono specificati:

- tecnologia fotovoltaica, classificata in base al materiale semiconduttore;
- orientamento (azimut) dei moduli, angolo tra la normale ai moduli fotovoltaici e il sud geografico;
- inclinazione (tilt) dei moduli, angolo formato tra il piano orizzontale e il piano di giacitura dei moduli fotovoltaici.

In relazione alla morfologia dell'edificio e al tipo di tessuto in cui si colloca l'intervento sono stabilite le superfici in cui integrare soluzioni BIPV, riportando in sintesi la *dimensione del sistema fotovoltaico (numero di pannelli utilizzati e area al m<sup>2</sup>)*.

Gli esiti energetici, ottenuti con il software PVSites sono i seguenti:

- *Potenza nominale dell'impianto (kWp) stimata*: dimensione dell'impianto fotovoltaico in termini di potenza nominale istantanea (massima teorica) che può essere prodotta dal sistema sottoposto a condizioni ottimali standard (irraggiamento solare 1.000 W/m<sup>2</sup>, Temperatura 25°C). La potenza dipende dalle caratteristiche intrinseche del modulo (tecnologia fotovoltaica) e dalle dimensioni dell'impianto, mentre è indipendente dalle condizioni di installazione (posizione geografica, clima, azimut, tilt, ecc.).
- *Produzione energetica annua stimata (kWh anno) e al m<sup>2</sup> (kWh/m<sup>2</sup> anno)*: quantità di energia elettrica che può essere prodotta dall'impianto fotovoltaico nell'arco di un anno.
- *Rendimento annuo stimato (kWh/kWp)*: misura che descrive la quantità di energia espressa in kWh per kWp.
- *Perdite per effetto delle ombre stimate (%)*: misura percentuale delle perdite derivanti dalla presenza di ombre portate sui moduli.
- *Perdite per effetto della temperatura stimate (%)*: le prestazioni delle celle fotovoltaiche decrescono al crescere della temperatura della cella stessa. Questa dipende da diversi fattori come, ad esempio, la temperatura dell'ambiente, la velocità locale del vento, il flusso/irradianza della radiazione solare e le caratteristiche termiche dei materiali che costituiscono il modulo.

Gli esiti energetici vengono corredati da grafici relativi all'irradianza o radiazione solare che colpisce direttamente i moduli simulati e istogrammi che mostrano la produzione energetica e le perdite per effetto delle ombre nei diversi mesi dell'anno.

#### *Esiti energetici parziali in relazione a soluzione tecnica e orientamento o inclinazione*

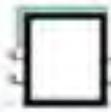
Nelle note vengono riportati dati di interesse particolare per orientare la progettazione di sistemi BIPV come la variazione, rispetto ad una stessa soluzione tecnologica, della produzione energetica e delle perdite al variare della superficie del fabbricato simulato.

Viene di seguito riportata una scheda esemplificativa dei casi applicativi. Le Schede di simulazione di BIPV su casi applicativi complete sono riportate in Appendice (cfr. Appendice 5).

Schede di simulazione di BIPV su casi applicativi

**SM.04.A2.01**

**Edificio in linea con balconi e copertura piana**



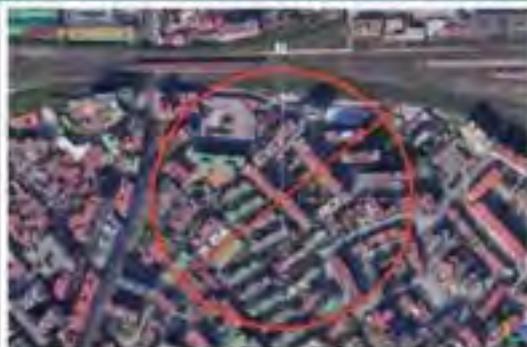
---

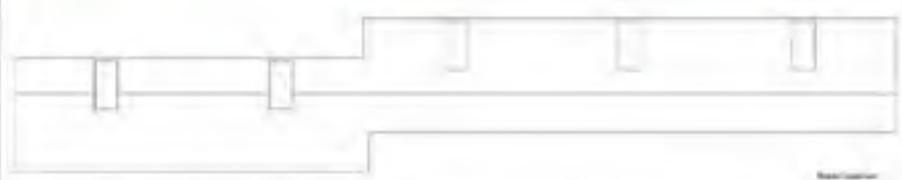
**Dati di base:**

<i>Localizzazione:</i>	Via Dalmazia, Cavalleggeri d'Acosta - Fuorigrotta, 80124 Napoli	
	Coordinate: 40°45'07"N, 14°11'23"E / Altitudine: 17,0 m s.l.m.	
<i>Destinazione d'uso:</i>	Residenziale	
<i>Epoca di costruzione:</i>	1950 - 1970	
<i>N° Piani:</i>	4	
<i>Superficie coperta:</i>	1.270m <sup>2</sup>	
<i>Altezza dell'edificio:</i>	14m	
<i>Aggregazione planimetrica:</i>	Aggregazione lineare con spazio di pertinenza esterno adibito a giardino	

---

**Aspetti ambientali e tipo-morfologici relativi all'edificio e al contesto**



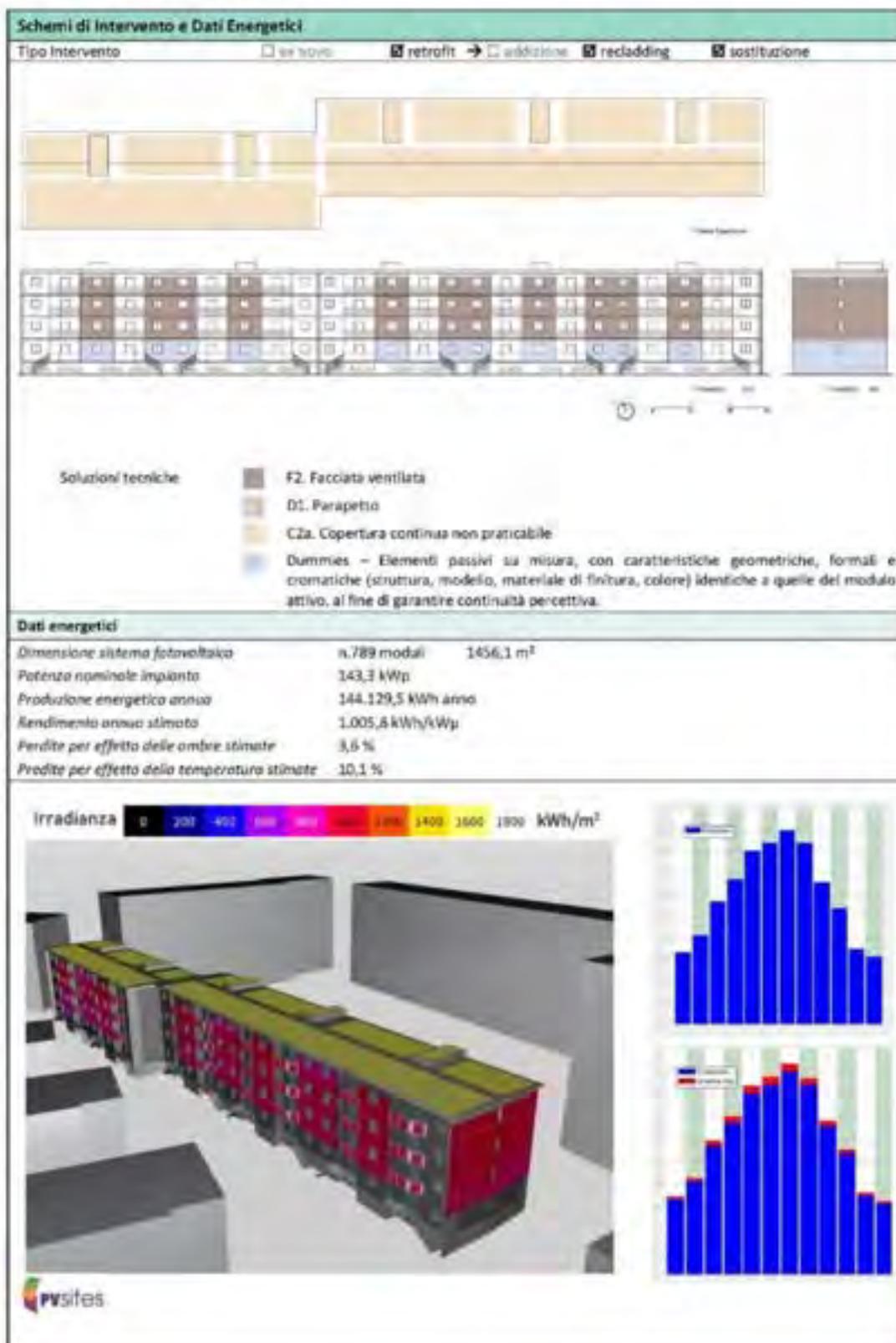
Modulo (piani)




Modulo (piani)      Sezione (m)

<i>Orientamento</i>	<input type="checkbox"/> N-S	<input checked="" type="checkbox"/> NE-SO	<input type="checkbox"/> NO-SE	<input type="checkbox"/> E-O			
<i>Morfologia urbana</i>	<i>Contesto urbano moderno</i>	<input type="checkbox"/> 001	<input type="checkbox"/> 002	<input type="checkbox"/> 003	<input checked="" type="checkbox"/> 004	<input type="checkbox"/> 005	<input type="checkbox"/> 006
<i>Morfologia edificio</i>	<i>Presenza di balconi e copertura piana</i>	<input type="checkbox"/> 0A1	<input checked="" type="checkbox"/> 0A2	<input type="checkbox"/> 0A3	<input type="checkbox"/> 0B1	<input type="checkbox"/> 0B2	<input type="checkbox"/> 0B3
<i>Tipo di edificio</i>	<i>Sviluppo prevalente in lunghezza</i>	<input checked="" type="checkbox"/> 001	<input type="checkbox"/> 002	<input type="checkbox"/> 003	<input type="checkbox"/> 004	<input type="checkbox"/> 005	<input type="checkbox"/> 006

Schede di simulazione di BIPV su casi applicativi



Schede di simulazione di BIPV su casi applicativi

### F2. Facciata ventilata

Unità tecnologica	Caratteristiche tecnologiche e morfologiche del modulo BIPV		
<input type="checkbox"/> F1 facciata ventilata <input checked="" type="checkbox"/> <b>F2 facciata ventilata</b> <input type="checkbox"/> F3 facciata ventilata pannello <input type="checkbox"/> F4 facciata ventilata	Produzione: <input type="checkbox"/> standard <input checked="" type="checkbox"/> custom Trasparenza: <input type="checkbox"/> semitransp. <input type="checkbox"/> trasparente <input checked="" type="checkbox"/> opaco Pannello: <input checked="" type="checkbox"/> piano <input type="checkbox"/> curvo Rigatura: <input checked="" type="checkbox"/> rigido <input type="checkbox"/> flessibile Isolamento: <input type="checkbox"/> isolato <input checked="" type="checkbox"/> non isolato Cornice: <input checked="" type="checkbox"/> presente <input type="checkbox"/> assente Durezze: <input checked="" type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> assenti	<input checked="" type="checkbox"/> standard <input type="checkbox"/> custom <input type="checkbox"/> modulare <input checked="" type="checkbox"/> spazio <input type="checkbox"/> curvo <input type="checkbox"/> flessibile <input checked="" type="checkbox"/> non isolato <input type="checkbox"/> assente <input type="checkbox"/> assenti	Forma: rettangolare Dimensioni: Da 500x1.500x15mm a 2.000x1.700x15mm Colori: celle e back-glass: nero Finitura: satinata, color antracite simil (A1) 7021. 3.2mm Pattern: antracite, stile invisibili
<b>Requisiti tecnologici connotanti la soluzione tecnica (UNI 8290:1983)</b>			
<input checked="" type="checkbox"/> resistenza meccanica carichi <input type="checkbox"/> emissione di calore <input checked="" type="checkbox"/> ventilazione naturale <input checked="" type="checkbox"/> tenuta all'acqua <input checked="" type="checkbox"/> isolamento termo-acustico <input type="checkbox"/> isolamento del flusso termico <input checked="" type="checkbox"/> controllo del fattore solare <input checked="" type="checkbox"/> resistenza agli agenti atmosferici <input checked="" type="checkbox"/> riscaldamento passivo tramite guadagni solari			
<b>Dati energetici</b>			
Tecnologia PV: <input checked="" type="checkbox"/> cristallino <input type="checkbox"/> film sottile Azimut (orientamento): <input type="checkbox"/> N <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> O Tilt (inclinazione): <input type="checkbox"/> 0° <input type="checkbox"/> 45° <input type="checkbox"/> 90° <input type="checkbox"/> 135°	<input checked="" type="checkbox"/> mono-Si <input type="checkbox"/> multi-Si <input type="checkbox"/> Si/SSBC <input type="checkbox"/> a-Si <input type="checkbox"/> CdTe <input type="checkbox"/> CIS/CIS2 <input type="checkbox"/> DSSC <input type="checkbox"/> BPV <input type="checkbox"/> HJT		
Dimensione sistema fotovoltaico: n.204 moduli    429,4 m <sup>2</sup> Potenza nominale impianto stimata: 69,4 kWp Produzione energetica annua stimata: 54.258,9 kWh/anno Produzione energetica annua stimata al m <sup>2</sup> : 126,4 kWh/m <sup>2</sup> annuo Rendimento annuo stimato: 781,3 kWh/kWp Perdite per effetto delle ombre stimate: 5,8 % Perdite per effetto della temperatura stimate: 10,4 %			
Irradianza:			

### D1. Parapetto

U. T. Dispositivi integrati esterni	Caratteristiche tecnologiche e morfologiche del modulo BIPV		
<input checked="" type="checkbox"/> <b>D1 parapetto</b> <input type="checkbox"/> D2 parapetto <input type="checkbox"/> D3 parapetto con sistema di apertura	Produzione: <input checked="" type="checkbox"/> standard <input type="checkbox"/> custom Trasparenza: <input checked="" type="checkbox"/> semi-trasp. <input type="checkbox"/> trasparente <input type="checkbox"/> opaco Pannello: <input checked="" type="checkbox"/> piano <input type="checkbox"/> curvo Rigatura: <input checked="" type="checkbox"/> rigido <input type="checkbox"/> flessibile Isolamento: <input type="checkbox"/> isolato <input checked="" type="checkbox"/> non isolato Cornice: <input type="checkbox"/> presente <input checked="" type="checkbox"/> assente Durezze: <input checked="" type="checkbox"/> presenti <input type="checkbox"/> assenti	<input type="checkbox"/> standard <input type="checkbox"/> custom <input type="checkbox"/> modulare <input type="checkbox"/> spazio <input type="checkbox"/> curvo <input type="checkbox"/> flessibile <input checked="" type="checkbox"/> non isolato <input checked="" type="checkbox"/> assente <input type="checkbox"/> assenti	Forma: rettangolare Dimensioni: 1.080x1.100x21,52mm Colori: front-glass: extrachiaro celle: nero back-glass: extrachiaro Finitura: faccia antiriflesso Pattern: griglia regolare

Schede di simulazione di BIPV su casi applicativi

Requisiti tecnologici connotanti la soluzione tecnica (UNI 8290:1983)		
<input checked="" type="checkbox"/> resistenza meccanica carichi	<input checked="" type="checkbox"/> protezione dalle cadute	<input type="checkbox"/> isolamento termico acustico
<input checked="" type="checkbox"/> ventilazione naturale	<input checked="" type="checkbox"/> tenuta all'acqua	<input checked="" type="checkbox"/> resistenza agli agenti atmosferici
<input checked="" type="checkbox"/> controllo del flusso luminoso	<input type="checkbox"/> controllo del fattore solare	<input type="checkbox"/> riscaldamento passivo tramite guadagni solari
Dati energetici		
Tecnologia FV	<input checked="" type="checkbox"/> cristallino	<input checked="" type="checkbox"/> mono-Si <input type="checkbox"/> multi-Si <input type="checkbox"/> Si Hetero
	<input type="checkbox"/> film sottile	<input type="checkbox"/> a-Si <input type="checkbox"/> CdTe <input type="checkbox"/> CH3CHS <input type="checkbox"/> DSSC <input type="checkbox"/> OPV <input type="checkbox"/> HIT(____/____)
Azimuth (orientamento)	+45° (SO)	
Tilt (inclinazione)	90° (verticale)	
Dimensione sistema fotovoltaico	n. 75 moduli	89,1 m <sup>2</sup>
Potenza nominale impianto	12,4 kWp	
Produzione energetica annua	9.620,8 kWh/anno	
Produzione energetica annua stimata al m <sup>2</sup>	108 kWh/m <sup>2</sup> /anno	
Rendimento annuo stimato	77,4 kWh/kWp	
Perdite per effetto delle ombre stimato	6,4 %	
Perdite per effetto della temperatura stimato	10,5 %	
		
		
		
C2a. Copertura continua non praticabile		
U. T. Copertura	Caratteristiche tecnologiche e morfologiche del modulo BIPV	
<input type="checkbox"/> C1 copertura discontinua	Produzione <input type="checkbox"/> standard <input checked="" type="checkbox"/> custom	Forma rettangolare
<input checked="" type="checkbox"/> C2 copertura continua (non praticabile)	Trasparenza <input type="checkbox"/> semi-trasp. <input type="checkbox"/> opaco	Dimensioni 5.412x373x7mm
<input type="checkbox"/> C3 copertura vetrata/curvatura	Planarità <input checked="" type="checkbox"/> piano <input type="checkbox"/> curvo	Dimensioni 2.680x373x7mm
	Rigidità <input type="checkbox"/> rigido <input checked="" type="checkbox"/> flessibile	Colori celle blu
	Isolamento <input type="checkbox"/> isolato <input checked="" type="checkbox"/> non isolato	Finitori evita antiriflesso
	Corona <input type="checkbox"/> presente <input checked="" type="checkbox"/> assente	Pattern griglia regolare
	Dimensioni <input type="checkbox"/> personalizzati <input checked="" type="checkbox"/> assenti	
Requisiti tecnologici connotanti la soluzione tecnica (UNI 8290:1983)		
<input checked="" type="checkbox"/> resistenza meccanica carichi	<input type="checkbox"/> protezione dalle cadute	<input checked="" type="checkbox"/> isolamento termico-acustico
<input type="checkbox"/> ventilazione naturale	<input checked="" type="checkbox"/> tenuta all'acqua	<input checked="" type="checkbox"/> resistenza agli agenti atmosferici
<input type="checkbox"/> controllo del flusso luminoso	<input checked="" type="checkbox"/> controllo del fattore solare	<input checked="" type="checkbox"/> riscaldamento passivo tramite guadagni solari
Dati energetici		
Tecnologia FV	<input type="checkbox"/> cristallino	<input type="checkbox"/> mono-Si <input type="checkbox"/> multi-Si <input type="checkbox"/> Si Hetero
	<input checked="" type="checkbox"/> film sottile	<input checked="" type="checkbox"/> a-Si <input type="checkbox"/> CdTe <input type="checkbox"/> CH3CHS <input type="checkbox"/> DSSC <input type="checkbox"/> OPV <input type="checkbox"/> HIT(____/____)

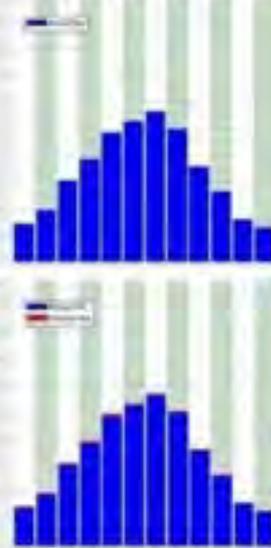
Schede di simulazione di BIPV sui casi applicativi

Azimut (orientamento)	+45° (SO)
Tilt (inclinazione)	0° e 3° (orizzontale e inclinato)
Dimensione sistema fotovoltaico	n.510 moduli 917,5 m <sup>2</sup>
Potenza nominale impianto	61,5 kWp
Produzione energetica annua	80.323 kWh/anno
Produzione energetica annua stimata al m <sup>2</sup>	85,7 kWh/m <sup>2</sup> anno
Rendimento annuo stimato	1.308,6 kWh/kWp
Perdite per effetto delle ombre stimato	1,6 %
Perdite per effetto della temperatura stimato	9,9 %



**GENERAL**  
ENERGIA

**Irradianza** 0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 kWh/m<sup>2</sup>

**PVsites**

**Exiti energetici parziali in relazione a soluzione tecnica e orientamento o inclinazione**

3. **F2. Facciata ventilata** (variazione orientamento)
  - Produzione m<sup>2</sup> moduli inclinazione 90° e orientamento sud-est: 132 kWh/m<sup>2</sup> anno
  - Produzione m<sup>2</sup> moduli inclinazione 90° e orientamento sud-ovest: 125 kWh/m<sup>2</sup> anno
4. **C2a. Copertura continua non praticabile** (variazione inclinazione)
  - Produzione m<sup>2</sup> moduli inclinazione 0° e orientamento sud-est: 85,8 kWh/m<sup>2</sup> anno
  - Produzione m<sup>2</sup> moduli inclinazione 3° e orientamento sud-est: 86,3 kWh/m<sup>2</sup> anno

#### 4.4 Esiti della sperimentazione progettuale

A partire dagli esiti della sperimentazione progettuale condotta è possibile elaborare alcune riflessioni sull'applicabilità di sistemi BIPV rispetto a contesti e caratteri tipo-morfologici differenti e sugli esiti energetici derivanti dall'integrazione di specifiche soluzioni tecniche.

Rispetto al contesto urbano di riferimento è necessario ricordare che - in considerazione dell'indice di morfologia urbana e dei dati sulla produzione energetica simulati - sono stati accomunati il tessuto 01 - *Contesto rurale/periferico* e quello 02 - *Contesto industriale*, così come il tessuto 04 - *Contesto urbano moderno* e quello 05 - *Contesto urbano ottocentesco*, che possono essere considerati analoghi in relazione alla valutazione della potenziale produzione energetica da sistemi BIPV su un edificio dimostratore. Considerato tale presupposto, dalle simulazioni effettuate nei diversi scenari è possibile rilevare come nei contesti di tipo 01 - *Contesto rurale/periferico* e 02 - *Contesto industriale* le superfici in facciata idonee rispetto al potenziale solare si collocano a partire dal primo livello dell'edificio, consentendo per gli edifici di Tipo 01 un'integrazione quantitativamente omogenea in copertura e facciata, mentre per quelli di Tipo 02, la possibilità di sfruttare le facciate per l'integrazione FV è limitata a circa il 40%, percentuale inferiore rispetto a edifici alti in altri contesti a causa della frequente presenza nei tessuti 01 e 02 di aggetti, rientranze o sporgenze.

Nei contesti di recente sviluppo destinati a funzioni direzionali gli edifici di Tipo 02, spesso caratterizzati da forme compatte e assenza di balconi o logge, consentono un'applicabilità fino all'80% delle superfici delle facciate, mentre la potenziale integrazione di BIPV in copertura diventa minima.

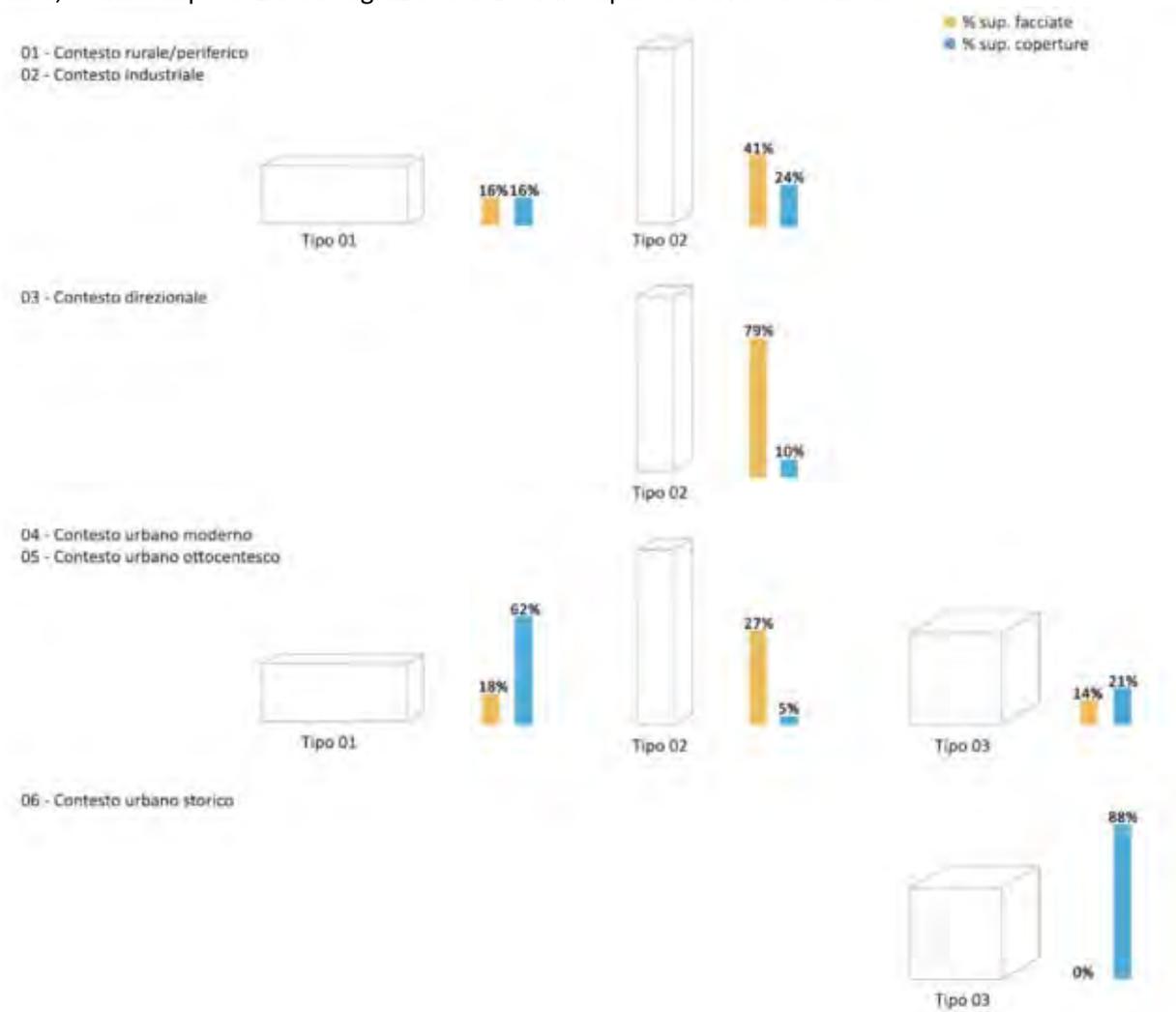


Figura 42. Variazione della percentuale media delle superfici idonee per l'installazione di sistemi BIPV suddivise per facciate e coperture in relazione ai tipi di edificio individuati nei diversi contesti urbani.

I tessuti di tipo 04 - *Contesto urbano moderno* e 05 - *Contesto urbano ottocentesco*, a causa della conformazione spaziale di edifici e strade, sono caratterizzati da rilevanti ombre portate sulle facciate degli edifici, consentendo l'applicazione di sistemi BIPV efficienti a partire dal secondo o terzo livello. In questi tessuti, le soluzioni BIPV in copertura si rivelano quelle più applicabili, in particolar modo per gli edifici di Tipo 01 per cui l'integrabilità raggiunge il 62%. Per gli edifici alti, anche in questo caso, la presenza di ombre portate da un lato e la complessità morfologica dall'altro, comporta un'applicabilità medio-bassa.

Il contesto urbano storico, testato solo per un caso applicativo, si rivela inadeguato all'integrazione di soluzioni tecniche BIPV in facciata, non solo per la complessità morfologica tipica degli edifici nei centri storici, ma anche per l'elevata presenza di ombre portate dovuta a valori dell'ampiezza media delle strade (Wm) estremamente bassi. Tuttavia, la possibilità di applicazione in copertura risulta alta, raggiungendo anche in caso di edifici vincolati potenzialmente l'80%.

In linea generale, rispetto ai caratteri tipo morfologici degli edifici analizzati, il Tipo 01 presenta superfici idonee prevalentemente in copertura (sia che si tratti di una superficie piana che inclinata), il Tipo 02 in facciata - in particolar modo quando si è in presenza di forme tendenzialmente compatte con livelli di ombre proprie bassi -, mentre il Tipo 03 consente una integrazione omogenea se non si rilevano particolari vincoli architettonici o urbani. Per gli edifici alti la producibilità in facciata risulta maggiore di circa il 40% sui fronti sud-est/sud-ovest rispetto a quelli nord-est/nord-ovest. Per tutti i tipi di edifici, in presenza di balconi la superficie idonea risulta inferiore al 56% della superficie totale della facciata, mentre le logge consentono un'integrazione maggiore, con percentuali comprese fra il 56% e l'83%. Un edificio di forma compatta, in assenza di elementi aggettanti, rientranze e sporgenze, garantirà la massima integrazione di sistemi BIPV in facciata, fino ad oltre l'80%. In generale, in casi in cui la complessità degli elementi architettonici in facciata risulta elevata, un'analisi dettagliata dell'irraggiamento in aree critiche selezionate permette di identificare le migliori tecnologie solari adatte alle condizioni locali, come l'esposizione all'irradiazione diretta o diffusa e riflessa, l'ombreggiamento e l'orientamento degli elementi dell'involucro dell'edificio.

Negli scenari individuati, le soluzioni tecniche BIPV che maggiormente sono risultate appropriate sono quelle riferite a coperture continue non praticabili (C2a) e a parapetti o coronamenti (D1). In molti casi applicativi, la presenza di facciate cieche ha portato alla simulazione di soluzioni FV integrate nelle facciate ventilate consentendo sia l'utilizzo dell'involucro edilizio per produrre energia, sia per migliorare l'isolamento termico dell'edificio. Molte delle soluzioni tecniche individuate sono state impiegate in più casi applicativi, consentendo un confronto in termini di producibilità dei sistemi BIPV in differenti contesti, orientamenti e condizioni tipo-morfologiche dell'edificio (Tabella 19).

**Tabella 19. Individuazione delle soluzioni tecniche BIPV maggiormente utilizzate nei casi applicativi.**

	Soluzioni tecniche	Utilizzo rilevato
 <p>[Fonte grafico: SUPSI]</p>	<b>C1</b> Copertura discontinua	1/13
	<b>C2a</b> Copertura continua non praticabile	10/13
	<b>C2b</b> Copertura continua praticabile	4/13
	<b>F2</b> Facciata ventilata	9/13
	<b>D1</b> Parapetto / Coronamento	10/13
	<b>D2</b> Frangisole / Schermatura solare	2/13
	<b>D3</b> Pensilina / Tettoia/ Pergola	3/13

Fra gli edifici campione sono stati selezionati anche casi in cui la presenza di una specifica valenza architettonica ha richiesto la simulazione di interventi di *light retrofit*, al fine di non alterare i caratteri architettonici presenti. Nel confronto fra scenari analoghi, la differenza fra interventi di *retrofit light* e *deep* che integrino soluzioni BIPV comporta in termini di produzione energetica una differenza sostanziale, fino a raggiungere variazioni del 70%. Tuttavia, anche in questi casi specifici, l'introduzione di sistemi BIPV costituisce non solo l'occasione per produrre energia da fonti rinnovabili, ma anche per migliorare le prestazioni termiche dell'involucro e restituire l'originaria qualità architettonica in alcuni casi modificata nel tempo da alterazioni antropiche.

**EDIFICIO A TORRE**  
Qualità e carattere architettonico dell'edificio

**ELEMENTI CONNOTANTI**

Gli elementi tipici e ricorrenti del linguaggio idiosyncratico, sempre riproposti in quegli anni da altri progettisti romani, nella più barocca modernità sono:



Di spigoli smussati che sottolineano i nervi longitudinali della

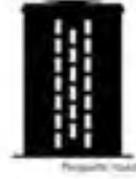


il coronamento in cemento rivestito nel prospetto, griglia in ferro e oggetti in metallo al filo di ferro.



Tipicamente, prevede la sua presentazione con finestre ad ingrandimento tendente al quadrato, l'altezza varia:  
 5 piani - 22 m  
 7 piani - 28 m

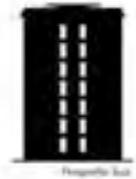
Alli elementi caratterizzanti il volume piccole finestre simboliche del semito in luce e i balconi alla romana (Jussé - Jusé)



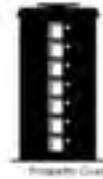
Prospetto Nord



Prospetto Est



Prospetto Sud



Prospetto Ovest

Il Palazzo Pontino di Napoli - la sede della 4ª Università - l'edificio pontino - anno 1957 - L. De Seta, Napoli modernità 1950 e 2000 (1950-1960), CARM, 2012.

Possibile intervento di retrofit del prospetto Sud



Progetto originale

Stato di fatto | Alterazioni architettoniche

Progetto

**1. BIPV IN INTEGRAZIONE**

Componenti: Glass, Cover Sheet, Dimensional Carrier, Frame, Interlayer, Mounting Hardware, Spacing, Spacers, Spigolo, Spigolo, Frame, Carrier.  
 Dimensione impianto: **32 m<sup>2</sup>**  
 Potenza nominale: **7 kWp**  
 Rendimento: **11%**

Strategia di un pannello con celle fotovoltaiche in silicio monocristallino PERC e con strato di colore esterno.  
 a. Strato di colore bianco  
 b. Vetro antiriflesso in silice  
 c. EVA - Etilene vinil acetato  
 d. Celle fotovoltaiche mono c. PERC  
 e. EVA - Etilene vinil acetato  
 f. Vetro antiriflesso posteriore

**2. BIPV IN INTEGRAZIONE**

Componenti: Glass, Cover Sheet, Dimensional Carrier, Frame, Interlayer, Mounting Hardware, Spacing, Spacers, Spigolo, Spigolo, Frame, Carrier.  
 Dimensione impianto: **184 m<sup>2</sup>**  
 Potenza nominale: **18 kWp**  
 Rendimento: **10%**

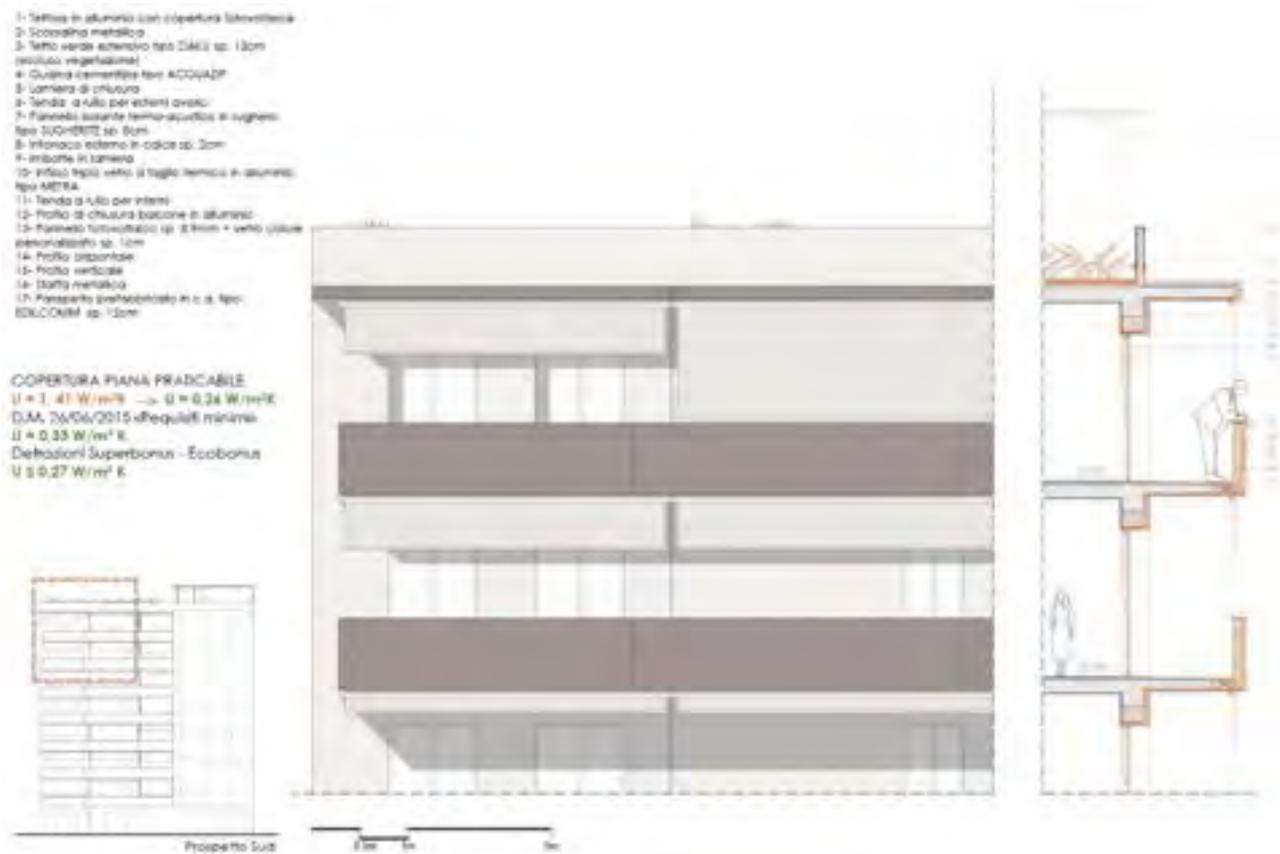
Strategia di un vetro fotovoltaico in silicio amorfo - trasparenza 30%.  
 a. Vetro antiriflesso  
 b. EVA - Etilene vinil acetato  
 c. Celle fotovoltaiche in silicio amorfo  
 d. EVA - Etilene vinil acetato  
 e. Vetro posteriore

Figura 43. Valutazione dell'applicabilità di sistemi BIPV in un edificio a torre in Via Campegn. Progettisti: M. Ridolfi, W. Frankl, V. Paladini, G. Rinaldi, V. Gabutti, D. Malagracci. Anno: 1957. (Elaborazione: C. Acquaviva).

Per l'edilizia residenziale pubblica, inoltre, la possibilità di creare pensiline o serre bioclimatiche che integrino soluzioni FV in copertura o in facciata diventa l'occasione per creare nuovi spazi polifunzionali e orti in copertura per la socialità, in linea con gli indirizzi progettuali dell'architettura in età post-pandemica.

Gli esiti della sperimentazione presentata sono chiaramente basati sull'analisi delle caratteristiche locali degli edifici nel contesto di riferimento, pertanto, la loro definizione e il potenziale solare possono variare sostanzialmente a seconda delle caratteristiche tipo-morfologiche degli edifici in altri contesti e delle differenti condizioni climatiche. Tuttavia, gli strumenti utilizzati per sviluppare le analisi sono prevalentemente *opensource* e *user-friendly*, rendendo facilmente replicabili tali sperimentazioni in altri contesti.

Le correlazioni effettuate - come esito della sperimentazione progettuale - fra contesto, caratteri tipo-morfologici degli edifici, caratteristiche tecnologiche ed energetiche dei sistemi BIPV possono contribuire a delineare diversi profili di integrabilità e di efficacia delle soluzioni proposte rispetto agli scenari di intervento nell'ultima fase della ricerca LA2.21.



**Figura 44. Integrazione di sistemi BIPV e controllo delle prestazioni termiche dell'involucro post retrofit (Elaborazione: C. Acquaviva).**

#### 4.5 Elaborazione di un set di indicatori per la valutazione della potenziale energia prodotta da sistemi BIPV

Al fine di definire un set di indicatori utili allo sviluppo del progetto di sistemi BIPV - nella valutazione delle precondizioni e prefigurazioni di soluzioni FV integrate - in quest'ultima fase della ricerca sono effettuate simulazioni sui tipi di edifici individuati e sui caratteri tipo-morfologici rispetto a dati climatici di riferimento per il territorio nazionale. Il territorio nazionale è infatti caratterizzato da sensibili oscillazioni di rendimento da regione a regione e la produzione di energia fotovoltaica per kW picco di potenza può variare da un minimo di circa 900-1000 kWh a un massimo di circa 1500 kWh l'anno. Per determinare soglie quantitative riferite alle potenziali produzioni di energia da sistemi BIPV sono quindi valutati tre livelli: il più alto per il sud Italia, il più basso calcolato in una città del nord e un valore intermedio simulato per il centro (le città di riferimento sono rispettivamente Palermo, Bolzano e Napoli). Il set di indicatori sviluppato intende quindi costituire uno strumento di supporto alla progettazione di sistemi BIPV a scala nazionale, definendo soglie qualitative e quantitative per comprendere, rispetto alle condizioni contestuali e tipo-morfologiche, i possibili esiti energetici derivanti dall'impiego di componenti architettonici BIPV.

Rispetto al contesto climatico di riferimento, i fattori che concorrono alla quantità di radiazione solare incidente su un sistema BIPV sono orientamento/azimut e inclinazione/tilt. Un altro fattore determinante è costituito dalle ombre presenti sulle superfici dell'involucro durante l'anno: esse possono essere causate dalle condizioni contestuali e quindi dal tipo di tessuto urbano in cui ricade l'edificio (ombre portate) o dalla morfologia stessa dell'edificio a causa della presenza di elementi aggettanti, rientranze e sporgenze (ombre proprie). Tipo di tessuto urbano e la morfologia edilizia costituiscono quindi due indicatori fondamentali per la stima della produzione energetica di un sistema BIPV, insieme al tilt e all'azimut del sistema BIPV.

La potenziale produzione energetica di un sistema BIPV verrà quindi valutata considerando i seguenti indicatori:

- orientamento/azimut;
- inclinazione/tilt;
- tipo di tessuto urbano;
- morfologia dell'edificio.

Il primo indicatore viene desunto dalla letteratura di riferimento, mentre gli altri sono calcolati attraverso set di simulazioni effettuate attraverso il tool PVSites (CADCAMation). Per indicatore si intende la definizione di un parametro che consente di comprendere in che modo è possibile raggiungere l'obiettivo mediante l'individuazione di classificazioni o soglie di verifica; nel caso specifico l'obiettivo preposto è la stima del potenziale energetico di un sistema fotovoltaico integrato in edificio che è parte di un determinato contesto. La valutazione degli indicatori sarà riferita quindi alla potenziale produzione energetica.

##### *Orientamento/azimut*

Le ricerche condotte sulla produzione energetica in relazione all'orientamento delle superfici (cfr. paragrafo 2.4) mostrano come l'orientamento/azimut che consente di ottenere la massima produzione energetica, è il sud/0°, mentre verso ovest/+90° ed est/-90° la produzione si riduce fra il 25% e il 50% (a seconda dell'inclinazione/tilt), e per i fronti sud-est/-45° e sud-ovest/+45° la riduzione si attesta fra il 5% e il 35% (Tabella 20). Nel caso di coperture orizzontali con inclinazione/tilt pari a 0° la produzione è invece superiore al 90%.

**Tabella 20. Variazione della produzione energetica in relazione all'orientamento delle superfici.**

	sud/0°	sud-est/-45° e sud-ovest/+45°	est/-90° e ovest/+90°
Riduzione percentuale della produzione energetica	0% - 30%	5% - 35%	25% - 50%

Per orientamenti/azimut rivolti a nord l'integrazione BIPV è solitamente sconsigliata se non per specifiche finalità di integrazione architettonica.

Rispetto all'orientamento/azimut, la produzione energetica viene quindi definita:

- bassa, quando si ha una riduzione percentuale della produzione energetica oltre il 35%;
- media, quando si ha una riduzione compresa tra il 30% e il 35%;
- elevata, quando la riduzione è inferiore al 30%.

Indicatore 1 Orientamento/azimut			
<i>Obiettivo</i> Stimare la potenziale produzione energetica al variare dell'orientamento			
<i>Orientamento/azimut</i>	<b>sud/0°</b>	<b>sud-est/-45°</b>	<b>est/-90°</b>
<i>Valutazione</i>	elevata	media	bassa
<i>Orientamento/azimut</i>	<b>sud-ovest/+45°</b>		<b>ovest/+90°</b>
<i>Valutazione</i>	media		bassa

#### Inclinazione/tilt

L'inclinazione/tilt ottimale per le superfici che integrano sistemi BIPV varia in relazione all'altitudine e al contesto di riferimento. Le simulazioni effettuate prendono in considerazione inclinazioni in copertura fra 0° - 60°, e superfici verticali a 90°. Dagli output vengono quindi definite le seguenti valutazioni in termini di potenziale produzione energetica da BIPV (Tabella 21):

- bassa, quando si ha una riduzione percentuale della produzione energetica di almeno il 40%;
- medio-bassa, quando si ha una riduzione compresa tra il 40% e il 10%;
- medio-elevata, quando la riduzione è inferiore al 10%;
- elevata, quando la riduzione è inferiore al 5%.

**Tabella 21. Variazione media della produzione energetica in relazione all'inclinazione/tilt delle superfici.**

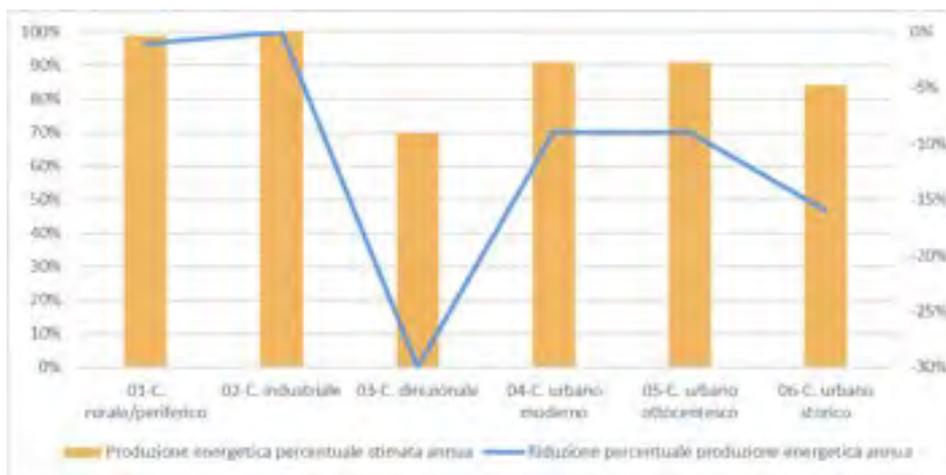
	Tilt 0°	Tilt 15°	Tilt 30°	Tilt 45°	Tilt 60°	Tilt 90°
Produzione energetica percentuale	94%	99%	100%	97%	89%	53%
Riduzione percentuale della produzione energetica	6%	1%	0%	3%	11%	47%

Indicatore 2 Inclinazione/tilt			
<i>Obiettivo</i> Valutare come varia la produzione energetica al variare dell'inclinazione della copertura di un edificio, a parità di tecnologia fotovoltaica utilizzata (silicio monocristallino), dimensione dell'impianto simulato, tessuto urbano, orientamento/azimut (N-S/0°) e tipo di edificio (tipo 03)			
Tipo 03			
<i>Tilt/inclinazione</i>	<b>A1</b>  tilt 0°	<b>B1.1</b>  tilt 15°	<b>B1.2</b>  tilt 30°
	19.833,6 kWh/anno (sud)	21.077,8 kWh/anno (sud)	21.288,9 kWh/anno (sud)
	17.304,4 kWh/anno (centro)	18.281,0 kWh/anno (centro)	18.438,0 kWh/anno (centro)
	12.606,6 kWh/anno (nord)	13.340,8 kWh/anno (nord)	13.491,8 kWh/anno (nord)
<i>Valutazione</i>	medio-elevata	elevata	elevata

	B1.3  tilt 45°	B1.4  tilt 60°	A1  tilt 90°
	20.492,2 kWh/anno (sud)	18.796,0 kWh/anno (sud)	12.713,4 kWh/anno (sud)
	17.786,8 kWh/anno (centro)	16.429,1 kWh/anno (centro)	9.745,5 kWh/anno (centro)
	13.061,9 kWh/anno (nord)	12.118,0 kWh/anno (nord)	8.573,3 kWh/anno (nord)
Valutazione	elevata	medio-bassa	bassa

**Tipi di tessuto**

Anche rispetto ai sei differenti tipi di tessuti urbani identificati sono state condotte simulazioni su un edificio dimostratore per analizzare l’impatto in termini di variazione della produzione energetica. Come è possibile osservare dal grafico (Figura 45), la produzione energetica più elevata si ottiene nel contesto 02 - *Contesto industriale*, mentre la produzione minore si ha nel contesto 03 - *Contesto direzionale*, a causa della presenza di rilevanti ombre portate dagli edifici circostanti sul sistema BIPV simulato. Se confrontiamo questi risultati con i parametri che definiscono la morfologia del contesto urbano (Figura 46), si comprende chiaramente quanto l’incidenza del fattore Hm - *Altezza media degli edifici*, sia determinante rispetto alla riduzione percentuale della produzione energetica annua. Le analisi dell’ombreggiamento dell’edificio dimostratore nei diversi contesti evidenziano in modo chiaro l’impatto del contesto su potenziali sistemi BIPV (Figura 47).



**Figura 45. Variazione di produzione energetica di un sistema BIPV (tecnologia in silicio amorfo) in relazione ai diversi tipi di tessuto individuati. Sulla colonna sinistra è riportata la produzione energetica simulata; su quella destra, le riduzioni percentuali della produzione energetica stimata.**

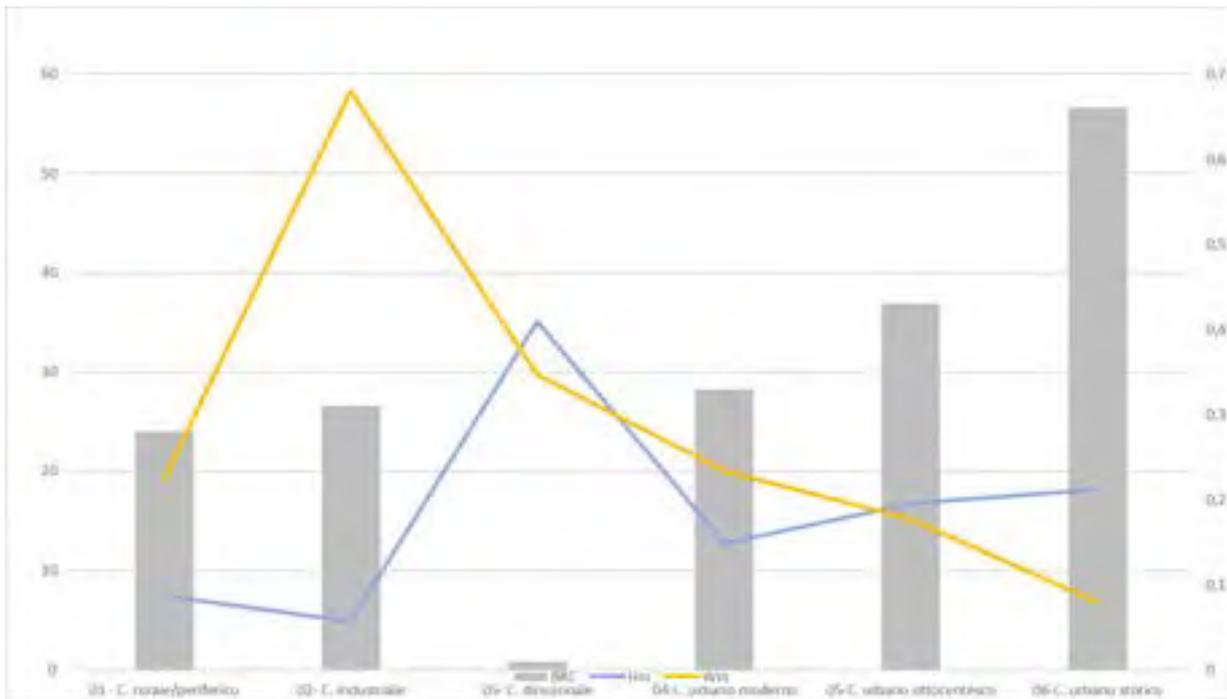
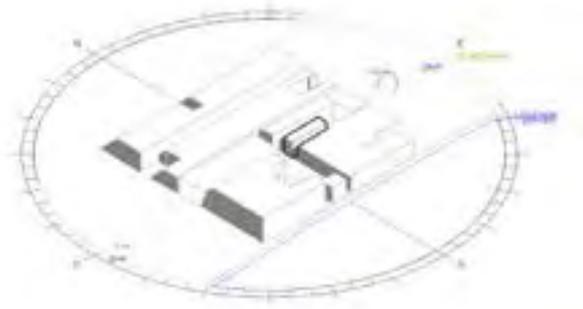
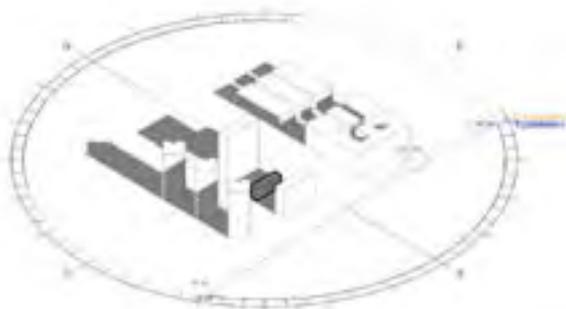


Figura 46. Variazione dei parametri che definiscono la morfologia urbana.

Contesto direzionale

Contesto storico



Contesto moderno

Contesto rurale/periferico

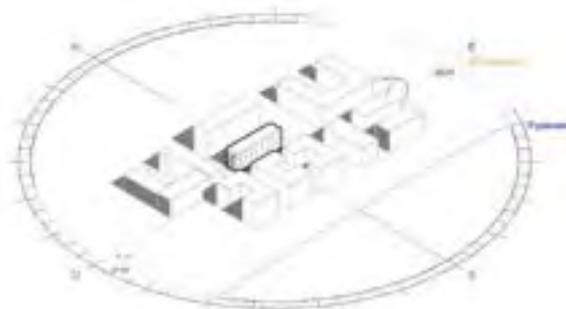
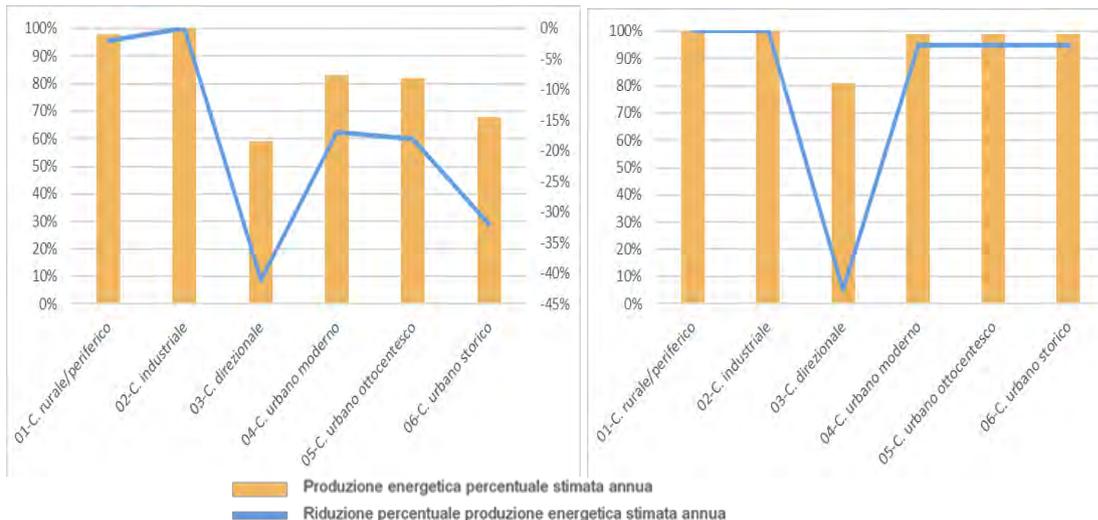


Figura 47 Analisi delle ombre portate su un edificio dimostratore all'interno di differenti tessuti urbani.

Se si analizza la variazione percentuale di produzione energetica suddivisa per sistemi BIPV in facciata (tilt/inclinazione 90°) e sistemi solari posizionati in copertura (tilt/inclinazione 0°), risulta evidente quanto in copertura le oscillazioni siano estremamente ridotte, mentre aumentano considerevolmente in facciata (Figura 48). Infatti, se un impianto fotovoltaico posizionato in copertura presenta un'oscillazione della produzione minima (circa 1%) nei diversi tessuti (ad eccezione del *Contesto direzionale* per i motivi sopra indicati), la produzione di un sistema BIPV in facciata presenta un'oscillazione rilevante, aumentando al

decrescere di Hm - Altezza media degli edifici e al crescere di Wm - Distanza media tra gli edifici o ampiezza delle strade.



**Figura 48. Grafici riferiti alla potenziale produzione energetica di sistemi BIPV su una copertura piana (a sinistra) e in facciata (a destra) nei sei tipi di tessuti urbani identificati.**

In definitiva, si evince che a parità di tecnologia fotovoltaica utilizzata (silicio monocristallino), dimensione dell’impianto simulato, orientamento/azimut (N-S/0°), inclinazione/tilt (facciata 90° e copertura 0°), morfologia edilizia (forma compatta e copertura piana) e tipo di edificio (tipo 01), la valutazione della produzione energetica sarà:

- bassa, quando si ha una riduzione percentuale della produzione energetica di almeno il 21%;
- medio-bassa, quando si ha una riduzione compresa tra il 14% e il 21%;
- medio-elevata, quando la riduzione è compresa tra il 14% e il 7%;
- elevata, quando la riduzione è inferiore al 7%.

Indicatore 3		Tipo di tessuto urbano		
<b>Obiettivo</b>		Valutare come varia la produzione energetica al variare del tipo di tessuto urbano, a parità di tecnologia fotovoltaica utilizzata (silicio monocristallino), dimensione dell’impianto simulato, orientamento/azimut (N-S/0°), inclinazione/tilt (facciata 90° e copertura 0°), morfologia edilizia (forma compatta e copertura piana) e tipo di edificio (tipo 01)		
<b>Tessuti</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	
	<b>Contesto rurale/periferico</b>	<b>Contesto industriale</b>	<b>Contesto direzionale</b>	
	167.054,2 kWh/anno (sud)	169.021,2 kWh/anno (sud)	121.171,9 kWh/anno (sud)	
	148.480,9 kWh/anno (centro)	150.108,2 kWh/anno (centro)	105.615,7 kWh/anno (centro)	
	108.914,6 kWh/anno (nord)	110.126,4 kWh/anno (nord)	76.132,0 kWh/anno (nord)	
<b>Valutazione</b>	elevata	elevata	bassa	
<b>Scenari</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	
	<b>Contesto urbano moderno</b>	<b>Contesto urbano ottocentesco</b>	<b>Contesto urbano storico</b>	
	156.711,3 kWh/anno (sud)	156.096,3 kWh/anno (sud)	145.205,6 kWh/anno (sud)	
	137.182,7 kWh/anno (centro)	136.228,7 kWh/anno (centro)	126.386,6 kWh/anno (centro)	
	100.381,6 kWh/anno (nord)	99.801,1 kWh/anno (nord)	92.721,6 kWh/anno (nord)	
<b>Valutazione</b>	medio-elevata	medio-elevata	medio-bassa	

### Morfologia dell'edificio

La morfologia edilizia influenza la progettazione dei sistemi BIPV secondo due aspetti: uno di carattere quantitativo, relativo alla superficie disponibile per integrare sistemi FV, e uno di carattere qualitativo, ovvero legato all'idoneità delle superfici a ospitare sistemi BIPV rispetto alla presenza di rilevanti ombre proprie. Infatti, elementi aggettanti, rientranze o sporgenze contribuiscono alla formazione di ombre sulle superfici, sarà quindi necessario valutare nello specifico le aree sufficientemente irraggiate e compatibili per l'integrazione FV. La potenziale dimensione dell'impianto solare varia quindi in relazione alla morfologia dell'edificio che può in alcuni casi determinare notevoli riduzioni in termini di produzione energetica.

Rispetto ai tre tipi di morfologie individuate – *Forma compatta*, *Presenza di balconi* o *Presenza di logge* - sono state effettuate una serie di simulazioni al fine di stabilire la variazione percentuale delle superfici idonee all'integrazione FV. Ad esempio, i dati della produzione energetica relativi alla morfologia A2 - *Presenza di balconi* e A3 - *Presenza di logge* sono stati valutati considerando i possibili range di estensione di balconi e logge e valutando una condizione intermedia tra le configurazioni possibili, sia per il tipo di edificio 01 che per il tipo di edificio 02 (Figura 49).



**Figura 49. Valutazione, a seconda della morfologia edilizia, delle aree idonee per integrazione di sistemi FV integrati. Valutazione dei possibili range di estensione di balconi (in alto) e di logge (in basso).**

In relazione agli output delle simulazioni effettuate è possibile stabilire che:

- in presenza di balconi, la superficie idonea sarà inferiore al 56% della superficie totale della facciata;
- in presenza di logge, la superficie idonea sarà compresa tra il 56% e l'83% della superficie totale della facciata;
- con un edificio di forma compatta, quindi in assenza di elementi aggettanti, rientranze e sporgenze, la superficie sarà superiore all'83% dell'intera facciata.

La stima delle percentuali è stata elaborata considerando la possibilità di integrare anche sulle superfici vetrate sistemi BIPV, quindi viene considerata come area totale della facciata la somma delle superfici opache e trasparenti.

Da tale analisi consegue la seguente valutazione della produzione energetica di un sistema BIPV, ottenuta normalizzando i dati ricavati dalle simulazioni e considerando come valore percentuale del 100% la produzione energetica massima simulata (Tabella 22):

- bassa, quando la produzione energetica si riduce almeno del 76% (caso A2 – *Presenza di balconi*);
- media, quando si ha una riduzione compresa tra il 38% e il 74% (caso A3 – *Presenza di logge*);
- elevata, quando la riduzione è inferiore al 38% (caso A1 – *Forma compatta*).

**Tabella 22. Variazione media della produzione energetica in relazione alla superficie idonea individuata.**

	A1 - forma compatta	A2 – presenza di balconi	A3 – presenza di logge
Produzione energetica percentuale	100%	27%	66%
Riduzione percentuale della produzione energetica	0%	73%	34%

<b>Indicatore 4 Morfologia dell'edificio</b>			
<i>Obiettivo</i>	<i>Valutare come varia la produzione energetica al variare della morfologia degli edifici, a parità di tecnologia fotovoltaica utilizzata (silicio monocristallino), orientamento/azimut (N-S/0°), inclinazione/tilt (facciata 90° e copertura 0°), tipo di tessuto (01 – Contesto rurale/periferico) e tipo di edificio (tipo 01 e tipo 02)</i>		
Tipo 01			
<i>Morfologia dell'edificio</i>	A1  Forma compatta	A2  Presenza balconi	A3  Presenza logge
	167.054,2 kWh/anno (sud)	109.849,5 kWh/anno (sud)	146.638,7 kWh/anno (sud)
	148.477,2 kWh/anno (centro)	89.271,3 kWh/anno (centro)	137.813,15 kWh/anno (centro)
	108.014,6 kWh/anno (nord)	70.530,05 kWh/anno (nord)	100.844,25 kWh/anno (nord)
<i>Valutazione</i>	elevata	bassa	media
Tipo 02			
<i>Morfologia dell'edificio</i>	A1  Forma compatta	A2  Presenza balconi	A3  Presenza logge
	278.547,6 kWh/anno (sud)	97.829,7 kWh/anno (sud)	181.919,3 kWh/anno (sud)
	251.988,5 kWh/anno (centro)	87.407,1 kWh/anno (centro)	163.575,15 kWh/anno (centro)
	183.664,6 kWh/anno (nord)	63.737,7 kWh/anno (nord)	119.223,65 kWh/anno (nord)
<i>Valutazione</i>	elevata	bassa	media

## 5 Conclusioni

La crescente sensibilità ecologica derivante dalle linee di indirizzo che emergono dalle COP (Conferenze delle Parti) sui Cambiamenti Climatici, da Agenda 2030 e dal Green Deal europeo per la transizione ecologica, si saldano come obiettivo comune di progressiva decarbonizzazione dei sistemi ambientali per l'uscita dalla stagnazione economica prodotta dalla crisi pandemica che ha svolto un ruolo di acceleratore per una transizione già programmata ma non ancora attuata. Sullo scenario internazionale si registra la progressiva affermazione di una *economia digitale verde* in cui l'efficienza e la produttività consentiranno di ridurre l'impronta di carbonio. La crescita di un nuovo sistema economico ibrido potrà essere possibile con il "disassemblaggio" dell'infrastruttura energetica basata sulle fonti fossili e inquinanti, adattando la nuova infrastruttura energetica alle necessità dello sviluppo delle energie rinnovabili, mentre la rete elettrica centralizzata dovrà essere riconfigurata divenendo una sorta di internet dell'energia rinnovabile digitale distribuita e intelligente [12b].

Dopo un periodo di rallentamento e stasi, come riportato nel capitolo 1, il fotovoltaico sembra aver trovato la propria stabilità e torna a crescere l'ottimismo in questa forma di produzione energetica, come confermato dai risultati di numerosi report e studi di settore che hanno rivelato una concreta ripresa. Se il mercato torna a salire e gli investitori ad avere fiducia, l'ambito dell'innovazione tecnologica attira su di sé le maggiori attenzioni: è questo il campo nel quale la sfida è ancora del tutto aperta per determinare i leader del settore e le tecnologie che si affermeranno come più efficaci ed efficienti. Le tecnologie BIPV sono chiamate quindi a una forte competizione con altre FER e la loro affermazione dipenderà dalla capacità di rendere vincenti alcuni fattori chiave di successo in campo economico, tecnologico e architettonico sia in termini di rendimento energetico che di fattibilità tecnico economica. I termini del confronto con le tecnologie competitors si misurerà sulla sensibilizzazione, sulla convenienza tecnico economica, sulle capacità di risposta architettonica e industriale per l'edilizia, sugli incentivi a partire dagli ecobonus.

Le più recenti e significative esperienze di ricerca a livello nazionale e internazionale, alla scala edilizia e urbana, sono state sviluppate con l'obiettivo di superare le barriere che limitano la diffusione delle tecnologie fotovoltaiche negli edifici e nelle città, rendendo pervasive le tecnologie fotovoltaiche architettonicamente integrate mediante la definizione di criteri, linee guida e strategie per una diffusione massiva dei sistemi BIPV sul mercato. Come illustrato nel capitolo 2, tra le azioni finalizzate alla diffusione di buone pratiche per l'integrazione del fotovoltaico in architettura, i portali e i database sui BIPV costituiscono una risorsa preziosa, dalla cui consultazione è possibile ricavare informazioni efficaci sui progetti e prodotti BIPV maggiormente diffusi in Europa. La sintesi degli esiti più interessanti che emergono da tali ricerche, in particolare alla scala edilizia, ha supportato una rielaborazione critica di un set di criteri e indicatori utili alla valutazione della qualità dell'integrazione architettonica con sistemi BIPV, considerata da un punto di vista tecnologico e morfologico.

Come è accaduto all'inizio degli anni '90 per alcune altre tecnologie, anche per il BIPV si sta attuando una trasformazione verso il concetto di "tecnologia diffusa", così definita per il fatto che essa permea l'edificio rinunciando alla evidenziazione di una tecnologia denunciata in alcuni punti rappresentativi o morfologicamente esibiti dell'edificio. L'inversione di tendenza, illustrata nel capitolo 3, è derivata da una modificazione della logica del progettare in accordo con l'innovazione disponibile. Negli interventi ex-novo la sinergia industria-progettista ha sollecitato la sperimentazione, applicando in maniera originale sistemi innovativi che hanno modificato il design degli edifici contemporanei, in cui linguaggio, tecnica e spazialità hanno raggiunto esiti significativi a partire da una concezione innovativa dell'involucro realizzato con sistemi BIPV. Nel campo della riqualificazione degli edifici esistenti si è spesso avuta la necessità di dover fornire qualità originariamente non previste o da incrementate sensibilmente, sviluppando un'innovazione che ha interessato gli edifici in maniera ampia e articolata.

Questo tipo di innovazione si attua attraverso soluzioni integrate, ricorrendo anche a concezioni evolute del progetto secondo principi di funzionamento non convenzionali. I recenti sviluppi della ricerca stanno dunque sgombrando il campo da una possibile erronea convinzione secondo cui soluzioni innovative poco enfatizzate siano di minore validità rispetto a quelle morfologicamente caratterizzate. L'essere poco appariscente o

nascosta in parti consuete dell'edificio può costituire, in molti casi, un significativo valore aggiunto dell'innovazione, secondo una prospettiva in cui essa risulta maggiormente diffusa garantendo, quindi, uniformità delle prestazioni in tutti i punti dell'involucro architettonico

L'incremento di qualità, performatività e complessità del progetto architettonico attuato con l'utilizzo di sistemi BIPV è oggi anche esito della moltiplicazione delle innovazioni dovute alla ricerca applicata dell'industria e alla richiesta di competenze altamente specialistiche. La versatilità delle linee produttive, le politiche di soddisfacimento delle esigenze dei soggetti interessati (imprese, progettisti, utenti), le innovazioni orientate alla flessibilità, ma anche alla specializzazione dei prodotti, rappresentano alcuni dei punti significativi di una convergenza fra cultura progettuale e cultura industriale. Gli apporti forniti dalle tecnologie sono portatori di precondizioni e prefigurazioni utili e integrate per lo sviluppo del progetto e delle performance competitive sul mercato dell'energia e dell'edilizia.

Per meglio delineare uno stato dell'arte sull'impiego dei BIPV in Italia e in Europa nel campo dell'edilizia ex-novo e del retrofit tecnologico, individuando le principali caratteristiche morfologiche e tecnologiche delle installazioni, e di orientare progettisti e installatori verso la selezione di sistemi e componenti edilizi BIPV appropriati, nel capitolo 3 è stato elaborato un catalogo di prodotti BIPV presenti sul mercato italiano e un catalogo di riferimenti progettuali nazionali e internazionali "esemplari", efficaci dal punto di vista della qualità morfologica e funzionale dell'integrazione, degli aspetti di efficienza e riduzione dei consumi energetici e dell'impatto e comunicabilità dei risultati conseguiti.

Dai cataloghi elaborati emerge chiaramente come la produzione industriale di sistemi e componenti BIPV è caratterizzata da un trend che vede l'integrazione di stratificazioni multimateriale e abbinamento di differenti tecniche e sistemi (elementi superficiali, supporti, cablaggi, ecc.) tesi a definire sistemi integrati - con il concorso di più produttori e una industria leader - presenti sul mercato attraverso l'offerta di prodotti-servizio e una loro articolata diversificazione. Emerge quindi il superamento della sola mono-funzionalità riferita alla produzione energetica e l'ampliamento dei range prestazionali verso un maggior numero di finalità e obiettivi di carattere edilizio nell'ambito delle facciate e coperture (funzionalità di schermatura, ventilazione naturale, delimitazioni, affacci, aspetti termo-igrometrici, ecc.).

Nell'ultimo capitolo, al fine di elaborare uno strumento per la conoscenza degli aspetti che determinano una corretta integrazione dei sistemi fotovoltaici con l'organismo edilizio, è stato definito un Repertorio di soluzioni tecniche BIPV che rappresenta una sintesi delle soluzioni maggiormente diffuse - sia per interventi ex-novo, che per interventi di retrofit - dedotte mediante un procedimento analogico riferito alla schedatura dei casi studio, all'analisi della produzione industrializzata per l'edilizia e ai sistemi e componenti BIPV catalogati. Le soluzioni tecniche rimandano, inoltre, alle *Schede prodotto* e alle *Schede casi studio* elaborate al fine di restituire - anche in termini di integrazione architettonica - un riferimento sui possibili esiti morfologici e linguistico-espressivi.

La sperimentazione progettuale condotta su casi applicativi reali ha consentito di testare tali soluzioni relazionandole con specifiche condizioni riferite al contesto urbano e ai caratteri tipo-morfologici degli edifici, delineando diversi profili di integrabilità e di efficacia delle soluzioni proposte rispetto agli scenari di intervento. Tali esiti, insieme al *Set di indicatori* elaborato nell'ultima fase della ricerca per la valutazione della potenziale energia prodotta da sistemi BIPV in relazione ai caratteri tipo-morfologici e contestuali contribuiranno alla definizione delle Linee guida per la diffusione di sistemi BIPV nel contesto nazionale (LA2.21).

Negli indirizzi di politica tecnica nazionale finalizzati ad affrontare la prospettiva cruciale della decarbonizzazione, i sistemi BIPV possono svolgere un ruolo significativo per la progressiva sostituzione delle fonti fossili attraverso il ricorso a innovazioni tecnologiche e a misure di riduzione dei fabbisogni e quindi dei consumi di energia per bilanciare un presumibile incremento della domanda. Il suo allargamento apre a una fase per i sistemi BIPV in cui coniugare innovazione delle tecnologie di produzione FV e sistemi integrati per l'edilizia, per far fronte a un 'futuro elettrico' tenendo conto della crescente competizione sul piano prestazionale e dei costi. Rispetto all'incremento della domanda e alla necessità di un'economia *carbon neutral*, senza una forte accelerazione e promozione nel campo edilizio, non saranno sufficienti le

installazioni residenziali e sugli edifici pubblici, ma dovranno in ogni caso essere installati grandi impianti a terra e ricorrere ad altre tecnologie FER (idrogeno, eolico, ecc.). Si apre quindi uno scenario di competizione anche fra le varie opzioni FV all'interno delle quali i sistemi BIPV sono chiamati a definire un efficace posizionamento strategico, tenendo conto che il quadro normativo pone ancora fiducia su una produzione anche concentrata in grandi impianti.

In riferimento alla domanda di ricerca, alle condizioni di mercato, alla necessità di modificare l'approccio progettuale, tenendo conto di buone pratiche e condizioni di contesto nell'ambito di una fase di sperimentazione, gli esiti della linea LA2.20 predispongono all'elaborazione di Linee Guida, previste nella linea LA2.21, in cui sono necessarie un'innovativa consapevolezza e una capacità operativa relative al progetto alla scala edilizia e urbana, attualmente anello debole nell'esperienza nazionale di integrazione del fotovoltaico. Il superamento di questo limite può consentire di elevare e riallineare competenze specialistiche nel campo della produzione industrializzata in campo FV e del progetto edilizio, in un certo senso rimaste poco evolute per il mancato sostegno di una incentivazione e di un'ampia strategia nazionale e internazionale degli interventi di retrofit o di nuova edificazione basati sull'integrazione spinta del fotovoltaico.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. G. Torchiani, “Il Fotovoltaico in Italia entra nella sua quarta fase: dati e prospettive”, LUMI, 2021 [<https://www.lumi4innovation.it/il-fotovoltaico-in-italia-entra-nella-sua-quarta-fase-dati-e-prospettive/>].
2. Ministero dell’Ambiente e della tutela del territorio e del mare, “Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici”, 2015.
3. <https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-p/piano-nazionale-integrato-per-l-energia-e-il-clima-2030-pniec.html>.
4. <https://www.infobuildenergia.it/pniec-nuova-capacita-fotovoltaica-anno/>.
5. <https://www.infobuildenergia.it/comunita-energetiche>.
6. <https://www.rinnovabili.it/le-aziende-informano/alleanza-per-il-fotovoltaico-in-italia-sostiene-le-misure-del-pnrr/>.
7. <https://www.rinnovabili.it/energia/politiche-energetiche/decreto-semplificazioni-energie-rinnovabili/>.
8. <https://www.energyup.tech/sostenibilita/comunita-energetiche-il-futuro-per-lo-scambio-energetico-produttivo-nelle-infrastrutture/>.
9. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, “Riscaldamento globale di 1,5 °C. Sommario per i decisori politici”, 2018 [<http://ipccitalia.cmcc.it/ipcc-special-report-global-warming-of-1-5-c/>].
10. IPCC, WGII AR5 WGII AR5 Fase I Presentazione del Rapporto, Sommario per i Policymaker, 2014.
11. S. Caserini, “Il clima è (già) cambiato”, 2016, Edizioni Ambiente, Milano.
12. J. Rifkin, “Un Green New Deal globale. Il crollo della civiltà dei combustibili fossili entro il 2028 e l'audace piano economico per salvare la terra”, 2019, Mondadori, Milano, p.11 (a), p.23 (b), (c) p.29, (d) p.61, (e) p.256.
13. LAZARD (2018), Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage 2018 [<https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2018>].
14. M. Esposito, “Il nuovo fattore di disruption il cambiamento climatico” in E. Sassoon (a cura di), *La sfida planetaria*, 2019, Harvard Business Review, Mind Edizioni, Milano.
15. F. Starace, “Il futuro è elettrico”, in E. Sassoon (a cura di), *La sfida planetaria*, 2019, Harvard Business Review, Mind Edizioni, Milano, p. 61 (a), p.61 (b).
16. D. Chiaroni, V. Chiesa, F. Frattini, “A rapidi passi verso la smart energy”, in E. Sassoon (a cura di), *Dallo sviluppo senza limiti ai nuovi limiti allo sviluppo*, 2019, Harvard Business Review Italia, (a) p.75, (b) p.81 [<https://www.talentedge.it/wp-content/uploads/2019/02/Macrotrend-2018-robotti.pdf>].
17. IEA PVPS Task 15, Subtask C, “International definitions of BIPV”, Report IEA-PVPS T15-04:2018.
18. EN 50583-1:2016 - Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules.
19. IEC 63092-1:2020 - Photovoltaics in buildings - Part 1: Requirements for building-integrated photovoltaic modules.
20. GSE, “Guida agli interventi validi ai fini del riconoscimento dell’integrazione architettonica del fotovoltaico”, 2007.
21. A. Scognamiglio, “Architettura/Fotovoltaico. Stato dell’Arte e Prospettive di Ricerca”, in A. Scognamiglio, P. Bosisio, V. Di Dio (a cura di) *Fotovoltaico negli edifici. Dimensionamento, progettazione e gestione degli impianti*, 2009, pp. 29-48, Edizioni Ambiente, Milano.
22. M. Morini, “Architecture and Photovoltaics. Strategies, technologies and novel components for the building envelope”, PhD Thesis, 2015, Università degli Studi di Palermo.
23. IEA SHC Task 41 - Solar Energy and Architecture - <https://task41.iea-shc.org/>
24. IEA SHC Task 41, Subtask A2, “Solar energy systems in architecture - integration criteria and guidelines”, 2012.
25. IEA SHC Task 41, Subtask A3-2, “Designing photovoltaic systems for architectural integration - criteria and guidelines for product and system developers”, 2013.
26. M.C. Munari Probst, “Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems”, PhD Thesis, 2008, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne.
27. IEA SHC Task 40 - Net Zero Energy Solar Buildings - <https://task40.iea-shc.org/>

28. IEA SHC Task 56 - Building Integrated Solar Envelope Systems - <https://task56.iea-shc.org/>
29. IEA SHC Task 66 - Solar Energy Buildings - <https://task66.iea-shc.org/>
30. IEA PVPS Task 7 - Photovoltaic Power Systems in the built environment - <https://iea-pvps.org/research-tasks/photovoltaic-power-systems-in-the-built-environment/>
31. T. Schoen, D. Prasad, D. Ruoss, P. Eiffert & Sørensen, "Task 7 of the IEA PV Power Systems Program - Achievements and Outlook", Proceedings of 17th European Photovoltaic Solar Conference, October 2001, Munich, Germany, 2001.
32. C. Abbate, "L'integrazione architettonica del fotovoltaico: esperienze compiute. Progetti dal case studies report del task 7, International Energy Agency", 2003.
33. IEA PVPS Task 15 - Enabling framework for the development of BIPV - <https://iea-pvps.org/research-tasks/enabling-framework-for-the-development-of-bipv/>.
34. M.C. Munari Probst, C. Roecker, "Criteria and policies to master the visual impact of solar systems in urban environments: The LESO-QSV method", Solar Energy, 184 (2019), Pages 672-687, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.031>
35. M. Zimmermann, "Sustainable Renovation of Historical Buildings (SuRHIB)", 2013.
36. C.S. Polo Lòpez et al., "Optimization of Energy Interventions in Building of hi-storical-Architectonical value (ENBAU)", Lugano-Canobbio: Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 2012.
37. Efficient Energy for EU Cultural Heritage - [www.3encult.eu](http://www.3encult.eu).
38. I. Zanetti I., K. Nagel, D. Chianese, "Concepts for solar integration development of technical and architectural guidelines for solar system integration in historical buildings", 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia - Spain, 2010.
39. E. Lucchi, M. Tabak, V. Carì, M. Perna, "BiPV ed edifici storici: l'integrazione è possibile?", 2015.
40. Construct PV - <https://cordis.europa.eu/project/id/295981/it>.
41. B. van Berkel, T. Minderhoud, A. Piber, G. Gijzen (UNStudio), "Design innovation from PV-module to building envelope: architectural layering and non apparent repetition", 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2014.
42. PVSITES - [www.pvsites.eu](http://www.pvsites.eu).
43. BIPVBOOST - [www.bipvboost.eu](http://www.bipvboost.eu).
44. BE-SMART - [www.besmartproject.eu](http://www.besmartproject.eu).
45. INFINITE - <https://cordis.europa.eu/project/id/958397>.
46. PV Impact - <https://cordis.europa.eu/project/id/842547/it>.
47. BIPV Meet History - [www.bipvmeetshistory.eu](http://www.bipvmeetshistory.eu).
48. <https://www.supsi.ch/isaac/ricerca-applicata/involucro-innovativo/BIPV-meets-history.html>.
49. O. B. Jørgensen , J. Dahlberg, L. Deschamps, A. Delmas, P. Florio, F. Frontini, F. Garde, S. Giostra, J. Kanters, K. Kappel, Margarethe Korolkow, Kuhn Tilmann, M. Lundgren, M. C. Munari Probst, É. Nault, R. Nouvel, G. Peronato, C. S. P. Lopez, C. Roecker, A. Scognamiglio, S. S. Sørensen, T. Siems, K. Simon, D. Vettorato and K. Voss, "Approaches, Methods and Tools for Solar Energy in Urban Planning", IEA SHC Task 51/ Report B2", 2018.
50. G. Lobaccaro, C. Lindkvist, M. Wal & A. Wyckmans, "Task 51/Report C1 - Illustrative Prospective of Solar Energy in Urban Planning: Collection of International Case Studies", IEA SHC Task 51, 2017.
51. E. Saretta, P. Caputo, F. Frontini, "A review study about energy renovation of building façades with BIPV in urban environment" Sustainable Cities and Society", 2019, pp.343-355.
52. G. Lobaccaro, M. Lisowska, E. Saretta, P. Bonomo, F. Frontini, "A Methodological Analysis Approach to Assess Solar Energy Potential at the Neighborhood Scale", Energies, 2019, 12(18), 3554.
53. C. Polo Lopez , S. Saretta " Task 3.2 Confronto e analisi degli strumenti di mappatura solare e di stima del potenziale solare territoriale e individuazione del potenziale solare fotovoltaico del patrimonio immobiliare dell'area di cooperazione", 2020.
54. Solarkultur: <https://mendrisio.ch/wp-content/uploads/2019/05/03-solarkultur-it-final-web1.pdf>.
55. P. Bonomo, C. Polo Lopez, E. Saretta, P. Corti, F. Frontini, "bFAST: A Methodology for Assessing the Solar Potential of Façades in Existing Building Stocks", Eurosun 2018, 12th International Conference on Solar

- Energy for Buildings and Industry, Rapperswill (Switzerland), 11-13 September 2018. ISES conference proceedings, 2018, pp. 122-132.
56. S. Croce, D. Vettorato, "The definition of urban surface uses: a systemic approach for climate resilient and sustainable cities", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020.
  57. <http://task41casestudies.iea-shc.org/>.
  58. <https://task41.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/T41DA2-Solar-Energy-Systems-in-Architecture-28March2013.pdf>.
  59. IEA PVPS Task 15, Subtask A, "Successful Building-integration of Photovoltaics. A collection of International Projects", 2020 - <https://iea-pvps.org/key-topics/successful-building-integration-of-photovoltaics-a-collection-of-international-projects/>.
  60. [www.bipv.ch](http://www.bipv.ch).
  61. [www.solararchitecture.ch](http://www.solararchitecture.ch).
  62. [www.solarage.eu](http://www.solarage.eu).
  63. [www.bipv.eurac.edu](http://www.bipv.eurac.edu).
  64. IEA SHC Task 41, Subtask A2, "Solar energy systems in architecture - integration criteria and guidelines", 2012.
  65. IEA PVPS Task 7 "Potential for Building Integrated Photovoltaics", 2002.
  66. J. Kanters, M. Wall, "The impact of urban design decisions on net zero energy solar buildings in Sweden", 2014.
  67. N. Somboonwit, A. Boontore, "Identification of Building-Surrounded Obstacle Parameter Using Automated Simulation to Support Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Layout Planning in Thailand", 2017.
  68. <https://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/radiazione-solare/quantita-energia-solare-arriva-sulla-terra>.
  69. M. Morganti, A. Salvati, H. Roura, C. Cecere, "Urban morphology indicators for solar energy analysis. Energy Procedia", n.134, 2017, pp.807-814.
  70. A. Clua Longas, "Designing Energy-Efficient Façades to Meet Energy Transition Targets", PhD Thesis, 2019, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne.
  71. T. Herzog, R. Krippner, W. Lang, "Facade Construction Manual", DETAIL, 2004, Germany: Birkhauser.
  72. A.K.Pandey, V.V. Tyagi, J.A.L. Selvaraj, N.A. Rahim, S.K. Tyagi, "Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews", 53 (2016), pp. 859–884.
  73. IEA PVPS Task 15, Subtask E, "BIPV Design and Performance Modelling: Tools and Methods", 2019.
  74. N. Jakica, "State-of-the-art review of solar design tools and methods for assessing daylighting and solar potential for building-integrated photovoltaics. Renewable and Sustainable Energy Reviews", 81 (2018), pp. 1296-1328.
  75. D.K. Sharma, V. Verma, A.P. Singh, "Review and analysis of solar photovoltaic softwares", International Journal of Current Engineering and Technology, 4(2014), pp.725-731.
  76. P. Galli, "I trend del settore fotovoltaico entro il 2025", Green Planner Magazine, 2020 - <https://www.greenplanner.it/2020/09/22/trend-settore-fotovoltaico/>.
  77. SUPSI, "Building Integrated Photovoltaics: A practical handbook for solar buildings' stakeholders", Status Report 2020.
  78. <https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/conto-energia>.
  79. R. Scarano, "Introduzione", in R. Scarano, P. Portoghesi (a cura di), *L'architettura del sole*, 2005, Gangemi, Roma.
  80. M. Rossetti, "L'involucro architettonico contemporaneo", 2019, Maggioli, Sant'Arcangelo di Romagna.
  81. T. H. Reijenga, "Integrazione edilizia del fotovoltaico in architettura", in R. Scarano, P. Portoghesi (a cura di), *L'architettura del sole*, 2005, Gangemi, Roma.
  82. R. Landolfo, M. Losasso, M. R. Pinto (a cura di), *Innovazione e sostenibilità negli interventi di riqualificazione edilizia. Best practice per il retrofit e la manutenzione*, 2012, Alinea, Firenze.

83. A. Scognamiglio, P. Bosisio, V. Di Dio, "Fotovoltaico negli edifici. Dimensionamento, progettazione e gestione degli impianti", 2013, Edizioni Ambiente.
84. P. Bonomo, A. Chatzipanagi, F. Frontini, "Overview and analysis of current BIPV products: new criteria for supporting the technological transfer in the building sector", *Vitruvio International journal of Architecture Technology and Sustainability*, Volume 0, 2015.
85. Norma UNI 8290-2:1983 - Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti.
86. C. Filagrossi Ambrosino, D. Francese, "Sistemi solari e termofotovoltaici integrati", Progetto SMARTCASE - Soluzioni innovative MultifunzionAli per l'ottimizzazione dei Consumi di energia primaria e della vivibilità indoor nel Sistema Edilizio, 2016.
87. A. Pagliano, "Gli impianti fotovoltaici nei centri storici: problemi di impatto visivo", in AA.VV., *Abitare il futuro...dopo Copenhagen*, 13-14 Dicembre 2010 Napoli, Clean, Napoli, 2010, pp. 1302-1310.
88. IEA PVPS Task 15, Subtask B, "Categorization of BIPV applications", Report IEA-PVPS T15:2021.
89. T. E. Kuhn, C. Erban, M. Heinrich, J. Eisenlohr, F. Ensslen, D. Holger Neuhaus, "Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV)", *Energy & Buildings*, 231 (2021).
90. A. Scognamiglio, G. Graditi, F. Pascarella, C. Privato, "Boogie-Woogie, a photovoltaic glass-glass module "dancing" with the building", 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany.
91. A. Scognamiglio, "Photovoltaic landscapes: Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55 (2016), pp. 629-661.
92. IEA PVPS Task 15, Subtask E, "Coloured BIPV. Market, Research and Development", 2019.
93. M. Pelle, E. Lucchi, L. Maturi, A. Astigarraga, F. Causone, "Coloured BIPV Technologies: Methodological and Experimental Assessment for Architecturally Sensitive Areas", *Energies*, n.13 (2020).
94. P. Sehati, I. Malmros, S. Karlsson, P. Kovacs, "Aesthetically pleasing PV modules for the Built Environment", RISE Rapport n.8, 2019.
95. Norma UNI 8290-1:1981 - Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
96. IEA PVPS Task 15, Subtask C, "Compilation and Analysis of User Needs for BIPV and its Functions", 2019.
97. Pagliaro M., Palmisano G., Ciriminna R., *BIPV. Il fotovoltaico integrato nell'edilizia*, Flaccovio, 2009.
98. Report T.41.A1 "Building Integration of Solar Thermal and Photovoltaics - Barriers, Needs and Strategies", 2012.
99. P. Heinsteinst, C. Ballif, L.E. Perret-Aebi, "Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths", *Green* 2013.
100. M. Lavagna, "Life Cycle Assessment in edilizia", 2008, p.250.
101. A. Scognamiglio, K. Farkas, F. Frontini, L. Maturi, "Architectural quality and photovoltaic products", 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012.
102. Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2020), *Strategia per la Riqualificazione Energetica del Parco Immobiliare Nazionale (STREPIN)*.  
[https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/STREPIN\\_2020\\_rev\\_25-11-2020.pdf](https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/STREPIN_2020_rev_25-11-2020.pdf)
103. AA.VV., "Manuale di progettazione edilizia. Fondamenti, strumenti, norme. Volume 4. Tecnologie: requisiti, soluzioni, esecuzione, prestazioni", 1995, Hoepli.

## 7 Abbreviazioni ed acronimi

BIPV	Building Integrated Photovoltaics - Fotovoltaico architettonicamente integrato
BAPV	Building Added Photovoltaics - Fotovoltaico su edificio
ESCO	Energy service companies
FER	Fonti energetiche rinnovabili
ICT	Information and Communication Technology
IEA	International Energy Agency - Agenzia Internazionale dell'Energia
IEC	International Electrotechnical Commission - Commissione Elettrotecnica Internazionale
BIM	Building Information Modelling
BCR	Building Covering Ratio
Wm	Ampiezza media delle strade
Hm	Altezza media degli edifici
EPW	Energy Plus Weather Data
IFC	Industry Foundation Classes
JRC	Joint Research Centre
CSV	Comma Separated Values
gbXML	green building eXtensible Markup Language
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
LOD	Level of Development
CADD	Computer Aided Design & Drafting
UT	Unità tecnologica
CET	Classe di elementi tecnici
IGU	Insulating Glass Unit - Vetrocamera
c-Si	Crystalline Silicon - Silicio Cristallino
mono-Si	Monocrystalline Silicon - Silicio monocristallino
multi-Si	Multicrystalline Silicon - Silicio policristallino o multicristallino
PERC	Passivated Emitter and Rear Contact
BC	(Celle) Back contact
Bif	(Celle) bifacciali
FS (TF)	Film sottile (Thin Film)
a-Si	Amorphous Silicon - Silicio amorfo
μ-Si	Micro amorphous Silicon - Silicio micro amorfo
CdTe	Cadmium Telluride - Tellururo di cadmio
CIS/CIGS	Copper Indium Gallium (di)Selenide - (di)seleniuro di Rame Indio Gallio
OPV	Organic Photovoltaic - Fotovoltaico organico
DSSC	Dye-Sensitized Solar Cell - Celle di Grätzel

HJT	Heterojunctions - Eterogiunzioni
EVA	Etilene Vinil Acetato
PVB	Polivinilbutirrale
Isc	Short Circuit current - Corrente di cortocircuito
Imp	Current at max power - Corrente alla massima potenza
Voc	Open circuit voltage - Tensione a circuito aperto
Vmp	Voltage at max power - Tensione alla massima potenza
Wp	Potenza nominale
Wp/m <sup>2</sup>	Potenza specifica

## 8 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

**Valeria D'Ambrosio**, Dottore di Ricerca, Professore associato in Tecnologia dell'Architettura (ICAR/12) presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II. Svolge studi sul retrofit tecnologico e sulla progettazione ambientale degli edifici e degli spazi aperti attraverso l'utilizzo di tecnologie a basso impatto. I principali ambiti applicativi riguardano i processi di riqualificazione dei centri storici e dei quartieri di edilizia residenziale, nonché dei litorali e degli spazi verdi urbani. All'interno di tali contesti sono approfondite le strategie ambientali e le soluzioni progettuali innovative per l'adattamento e la mitigazione del rischio indotto dai cambiamenti climatici. Coordina e partecipa a gruppi di lavoro nell'ambito di programmi di ricerca nazionali (MIUR, PONREC, POR) e di Convenzioni stipulate con Enti e Amministrazioni pubbliche con esiti in Convegni nazionali e internazionali e con pubblicazioni a stampa. L'attività didattica di docenza è svolta nell'ambito di Corsi di Laurea universitari e nella didattica post-laurea (Dottorato di Ricerca, Master di 2° livello, Corsi di Perfezionamento, Corsi di Alta formazione). È componente del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e membro di Comitati scientifici nell'ambito di Master dell'Università di Napoli Federico II. È componente del gruppo di lavoro multidisciplinare sulla relazione tra innovazione tecnologica e ambiente Task Force dell'Ateneo Federico II Industria 4.0 dell'Unità di ricerca SET - Smart Environment and Technology, del Gruppo di esperti del "Manifesto della green economy per l'architettura e l'urbanistica" e del Tavolo tecnico degli Stati generali della green economy "Proposte di policy dell'architettura per la green economy nelle città". Dal 2017 è Componente del Consiglio Direttivo della SITdA - Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura.

**Mario Losasso**, architetto, è professore ordinario di Tecnologia dell'Architettura presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II. Attualmente è Presidente della SITdA, Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura e, presso il MUR - Ministero dell'Università e della Ricerca, è Componente della Commissione di esperti per il PNR Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027. Per l'Ateneo Federico II di Napoli è Delegato del Rettore all'Edilizia ed è Delegato per le Relazioni Esterne della Scuola Politecnica e delle Scienze di Base, nonché Coordinatore del Master di II livello "PRO-INN - Progettazione e riqualificazione architettonica, urbana e ambientale con l'utilizzo di tecnologie innovative" presso il Dipartimento di Architettura. I principali ambiti di ricerca riguardano la progettazione ambientale, il retrofit tecnologico e i processi di riqualificazione urbana, edilizia e degli spazi pubblici per l'adattamento e la mitigazione climatica.

**Enza Tersigni** è Architetto, Dottore di Ricerca e Ricercatore di Tecnologia dell'Architettura (ICAR/12) presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Dal 2008 svolge con continuità attività di ricerca presso il DiARC, avendo come obiettivo lo studio degli aspetti metodologici, decisionali e operativi deputati alla conoscenza e al controllo dei processi di trasformazione dell'ambiente costruito, con un focus specifico sui temi della sostenibilità ambientale e della digitalizzazione in campo progettuale e processuale. Dal 2017 è Componente del gruppo di ricerca - "SET - Smart Environment and Technology" del Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, all'interno della Task Force di Ateneo "Industria 4.0 e sviluppo sostenibile". Dal 2018 è membro dell'Urban Climate Change Research Network (UCCRN), rete formata da studiosi ed esperti di Università, Enti di ricerca ed Enti pubblici impegnati sui temi della mitigazione e dell'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano.

**Carolina Girardi**, si laurea in Architettura con votazione di 110/110 e Lode nel 2007 presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (DiARC), conseguendo nel 2012 presso la stessa Università il titolo di Dottore di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura (ICAR/12) XXIV Ciclo, sul tema: "Eco-efficienza e innovazione tecnologica nella produzione industriale per l'edilizia. Criteri per la selezione di prodotti per gli interventi di retrofit". Dal 2008 svolge con continuità attività di ricerca nell'ambito del SSD della Tecnologia dell'Architettura (ICAR/12), dal 2012 è titolare di un assegno di ricerca e numerose borse di studio presso il DiARC, collaborando a ricerche istituzionali e ad attività di coordinamento di convegni. Le attività di ricerca riguardano lo studio di soluzioni tecnico-progettuali e alternative di prodotto eco-innovative destinate agli interventi di efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente, approfondendo gli aspetti metodologici, decisionali e operativi deputati alla conoscenza e al controllo dei processi di trasformazione dell'ambiente costruito. È autrice di 10 Pubblicazioni su riviste scientifiche e atti di convegni internazionali.

**Salvatore Gifuni**, si laurea in Architettura con votazione di 110/110 e Lode nel 2020 presso il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (DiARC), sul tema: "Processi innovativi per la resilienza climatica dell'edilizia residenziale. Il Database di Supporto alle Decisioni DINAMO". Vincitore di una borsa di studio avente ad oggetto attività di ricerca e di un contratto di attività didattica integrativa nell'ambito del SSD della Tecnologia dell'Architettura (ICAR/12) presso il DiARC. L'attività di ricerca si concentra sulla valutazione delle prestazioni energetiche del patrimonio edilizio tramite processi interoperabili dal BIM al BEM per la valutazione dell'efficacia di soluzioni di retrofit tecnologico sulla mitigazione degli impatti climatici in ambito urbano.

## 9 Appendici

**Appendice 1** - Catalogo di prodotti BIPV

**Appendice 2** - Catalogo di “Casi di successo” BIPV

2a. Casi studio italiani - schede sintetiche

2b. Casi studio europei - schede sintetiche

**Appendice 3** - Catalogo di “Buone pratiche” BIPV

3a. Casi studio italiani - schede analitiche

3b. Casi studio europei - schede analitiche

**Appendice 4** - Repertorio di soluzioni tecniche BIPV

**Appendice 5** - Schede di simulazione di BIPV su casi applicativi

